





دانشکده علوم زمین

پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی اقتصادی

کانی شناسی، ژئوشیمی و کانی زائی عناصر خاکی کمیاب

در متاسوماتیت های ناحیه اسفوردی، شمال شرق بافق

نگارنده:

عرفان عمیدی مهر

اساتید راهنما:

دکتر مسعود علی پور اصل

دکتر حبیب ا... قاسمی

بهمن ۱۳۹۸

شماره ۹۸۱۳۰۲۱۷  
تاریخ ۹۸/۱۲/۲

پاسدانی



فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای عرفان عمیدی مهر با شماره دانشجویی ۹۵۱۰۶۷۴ رشته زمین شناسی گرایش زمین شیمی تحت عنوان کانی شناسی، ژئوشیمی و کانی زایی عناصر خاکی کنیاب در مناسباتیت های ناحیه اسفوردی، شمال شرق بافق که در تاریخ ۱۳۹۸/۱۱/۱۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰  ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹-۱۸   
 ج) درجه خوب: نمره ۱۷/۹۹-۱۶  د) درجه متوسط: نمره ۱۵/۹۹-۱۴   
 ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد   
 نوع تحقیق:  تئوری  عملی

مفتو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر مسعود علی پور اصل	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر حمید ا. قاسمی	استاد	
۳- استاد مشاور	-	-	-
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر مهدی رشایی کهنخانی	استادیار	
۵- استاد منتحن اول	دکتر محمود صادقیان	دانشیار	
۶- استاد منتحن دوم	دکتر فرج ا. فردوست	استادیار	

از طرف: مسعود علی پور اصل

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر پرویز امیدی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده: ۳۰ مرداد ۹۸

نمونه هر صورتی که کسی مرجمد شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تکمیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۲ ماه برگزار شود).

تقدیم به استوارترین تکیه گاهم □ پدرم □

به او که نمی دانم از بزرگی اش بگویم یا مردانگی، سخاوت، سکوت، مهربانی و...

تقدیم بابوسه به مقدس ترین واژه در لغت نامه دلم، مادر مهربانم، دریای بی کران فداکاری و

عشق، زندگیم را دیون لطف و عطف و زحمات مادرم میدانم آنکه آفتاب مهرش در آستانه

قلم، پنهان پابرجاست و هرگز غروب نخواهد کرد.

تقدیم به قلب های مهربان و پشوانه های زندگی ام:

برادرم رؤف و حاله عزیزم زیبا

## مشکر و قدردانی

نخستین پاس و ستایش از آن خداوندی است که بنده کوچکش را در دریای بیکران اندیشه، قطره‌ای ساخت تا وسعت آن را از دریچه اندیشه ناب استایدی بزرگ به تماشا نشیند؛ اما در این راه، چه بس بزرگوارانی که من را لایق ارشاد و محبت خویش دانستند. لذا بر خود لازم می‌دانم تا مراتب پاس را از بزرگوارانی بجا آورم که اگر دست یاری کرشان نبود مرکز این پایان نامه به انجام نمی‌رسید.

استادان راهنمای فریخته و مهربانم، دکتر مسعود علی پور اصل و دکتر حبیب ا... قاسمی، که در مقام قدردانی از زحمات بی‌شائبه‌ی آنها، زبان قاصر است و بی‌شک راهنمایی‌های ارزنده، دانش و دولسوزی اینجانبان سبب به انجام رسیدن این پایان نامه شده است.

از دکتر محمود صادقیان و دکتر فرج ا... فردوست که داور این پایان نامه را بر عهده داشتند و دکتر مهدی رضائی کهنانی که در کمال سه صدر با حسن خلق و فروتنی از هیچ‌کلی در این عرصه بر من دریغ نداشته‌اند، کمال مشکر و قدردانی را دارم.

از سرکار خانم زهره فارسی، مسئول آموزش دانشکده علوم زمین که همواره با مهربانی و دولسوزی ما را همراهی نموده اند بسیار پاس گذارم.

از آقای محمدیان، مسئول کارگاه تهیه مقطع که همیشه با پشتکار و صمیمیت من را در تهیه مقطع این پژوهش همراهی و از هیچ‌کلی دریغ نکرده‌اند و

همچنین آقای میرباقری، مسئول آزمایشگاه اپتیک و آقای قوشه‌ای کارشناس گروه دانشکده و سرکار خانم سعیدی مسئول پژوهشی

دانشکده و آقای آجدانی مسئول آبدارخانه دانشکده کمال مشکر را دارم.

از تمام دوستانم که در این راه، همواره وجودشان باید دگر می‌و امید بخش من بوده‌اند و در جبهه دفاع اینجانب شرکت نموده‌اند نهایت مشکر

وسپاسگذاری رامی نمایم:

آقایان پوریاولی خانی، محسن حمیدی، امید اسدی مهراد ناقوسی، محمد حسنی، کیوان ایمانی، یونس سرنخشی، آرش سنگ، محمد حسن نصر... نیا و خانم حاجیدث آقایی، مریم شوقانی، فرزانه پزشکی، سمیرا مددی، شیوا مسکینی، عاطفه علیپور، آسیه فضیلت، مریم نقوت،

زهره عباسی، مرضیه اسدی، نسیره کاظمی و مرضیه شیخی.

و در پایان بابوسه بردستان پدر و مادر عزیزم، که همیشه سختی‌ها را به جان خریدند تا من به جایگاهی که اکنون هستم، برسم نهایت تشکر و قدردانی

را دارم.

## تعهد نامه

اینجانب عرفان عمیدی مهر دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته زمین‌شیمی دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه کانی‌شناسی، ژئوشیمی و کانی‌زائی عناصر خاکی کمیاب در متاسوماتیت-های ناحیه اسفوردی، شمال شرق بافق تحت راهنمایی دکتر مسعود علی‌پور و دکتر حبیب‌ا... قاسمی متعهد می‌شوم:

تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است. در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است. مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.

کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید. حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.

در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.

در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

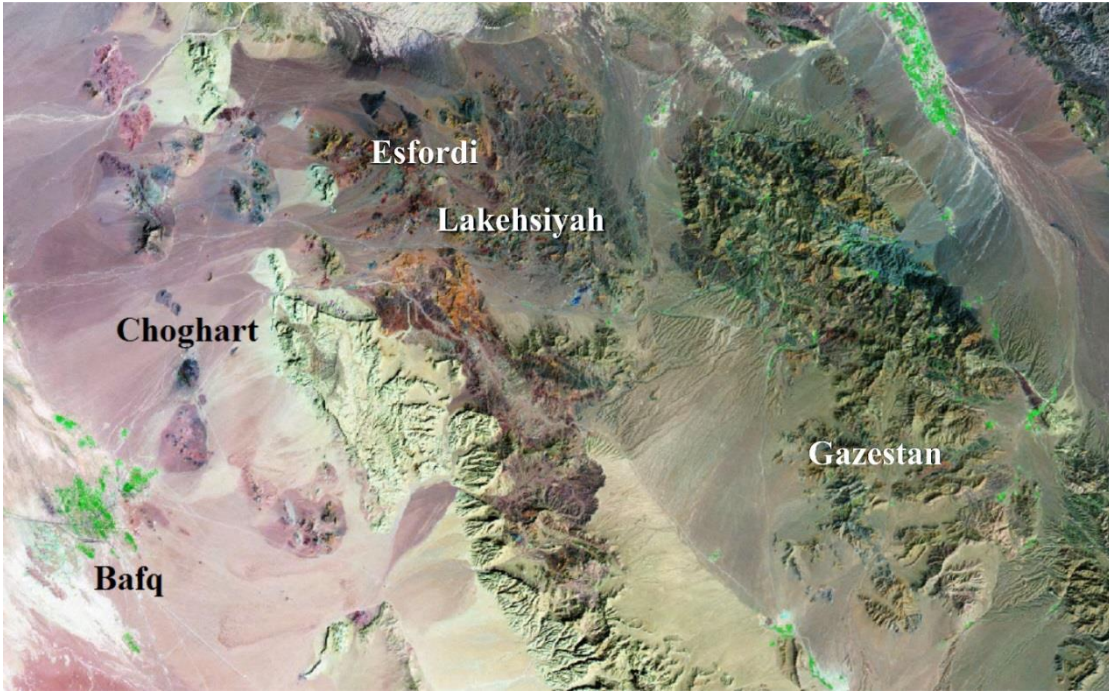
### مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

## مقالات مستخرج شده از این پایان نامه

عمیدی مهر ، ع.، علی پور اصل، م.، قاسمی، ح.، (۱۳۹۸) □ کانی شناسی و کانی زائی در منطقه اسفوردی، شمال شرق بافق □. سی و هشتمین گردهمایی ملی علوم زمین، سازمان زمین شناسی کشور.





تصویر ماهواره‌ای از منطقه فلزایی بافق

## چکیده

منطقه مورد مطالعه در فاصله ۱۲۰ کیلومتری شمال شرق شهرستان بافق در استان یزد واقع شده است. این منطقه بخشی از بلوک پشت بادام در خرده قاره ایران مرکزی است. در پژوهش حاضر مناطق اسفوردی، گزستان، لکه‌سیاه و چغارت برای مطالعه انتخاب شده است. در این مطالعه از سنگ‌ها و کانسنگ‌ها برای بررسی‌های سنگ‌شناسی، کانه‌نگاری، ژئوشیمیایی و میانبارهای سیال نمونه برداری صورت گرفته است. برپایه مشاهدات صحرایی سری آتشفشانی- رسوبی ریزو به سن نئوپروتروزوئیک پسین- کامبرین پیشین از گسترش وسیعی در منطقه فلززایی بافق برخوردار است. سری ریزو تناوبی از سنگ‌های دولومیتی، ماسه‌سنگ، ماسه‌سنگ توفی، شیل، گدازه و توف‌های بازالتی، گدازه و توف‌های ریولیتی، ریوداسیتی تا آندزیتی، متاسوماتیت‌ها، نوارهایی از چرت‌های آهن- دار (ژاسپیلیت) و اکسیدهای آهن- منگنز را شامل می‌شود. در این منطقه متاسوماتیت‌ها میزبان اصلی کانه‌زایی اکسیدهای آهن-آپاتیت می‌باشند و برپایه درصد کانی‌های مگنتیت و آپاتیت کانسنگ‌ها به انواع غنی از مگنتیت، مگنتیت-آپاتیت و غنی از آپاتیت تقسیم می‌گردد. کانه‌زایی به شکل‌های لامینه‌ای، توده‌ای، رگه-رگچه‌ای و به ندرت داریستی، دانه‌پراکنده، برشی و پرکننده فضاهای خالی مشاهده می‌شود. مطالعات کانه‌نگاری و بافتی وجود چهار نسل آپاتیت و سه نسل مگنتیت را نشان می‌دهد. مطالعات پترولوژی برپایه داده‌های ژئوشیمی سنگ‌های آذرین تشکیل آن‌ها را در یک محیط ریفت درون قاره نشان می‌دهد. عیار  $Fe_2O_3$  در کانسنگ‌های منطقه از ۸/۶۸ تا ۹۰/۶۵ درصد، عیار  $P_2O_5$  از ۰/۴۷ تا ۳۵/۵۱ درصد و عیار  $\Sigma REE$  از ۳۵۷ PPM تا ۱۴۷۶۲ PPM تغییر می‌نماید. الگوهای به‌هنجار شده عناصر خاکی کمیاب نمونه‌های کانسنگ نسبت به نمونه‌های مرجع مشابه یکدیگر بوده و غنی‌شدگی عناصر خاکی کمیاب سبک به سنگین و ناهنجاری منفی Eu در آن‌ها مشهود می‌باشد. متوسط مقادیر دمای همگن‌شدگی و شوری میانبارهای سیال در آپاتیت‌های نسل اول به ترتیب ۲۰۸ درجه سانتی‌گراد و ۲۰/۲۴ درصد وزنی معادل نمک طعام و در آپاتیت‌های نسل دوم ۱۸۱ درجه سانتی‌گراد و ۱۰/۳۶ درصد وزنی معادل نمک طعام می‌باشد. به طوری که میزان دما و شوری در آپاتیت‌های نسل اول بیش‌تر از نسل دوم است، که کاهش شوری در آپاتیت نسل دوم می‌تواند حاصل از اختلاط سیال‌های ماگمایی با آب‌های جوی در مراحل تأخیری کانه‌زایی باشد. در نهایت برپایه شواهد زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و میانبارهای سیال کانه‌زایی اکسیدهای آهن- آپاتیت در منطقه فلززایی بافق مشابه کانسارهای اکسید آهن- آپاتیت تیپ کایرونا است و ترکیبی از فرایندهای ماگمایی- گرمابی در تشکیل آن‌ها نقش داشته است.

**واژه‌های کلیدی:** اکسید آهن- آپاتیت، ژئوشیمی، میانبارسیال، ماگمایی- گرمابی، تیپ کایرونا، بافق.

## فهرست مطالب

۱	فصل اول کلیات.....
۲	۱-۱ مقدمه.....
۳	۲-۱ موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه و راههای دسترسی.....
۳	۳-۱ شرایط آب و هوایی منطقه.....
۴	۴-۱ وضعیت پوشش گیاهی و جانوری منطقه.....
۴	۵-۱ وضعیت اجتماعی و اقتصادی منطقه.....
۵	۶-۱ وضعیت زمین‌ریختشناسی منطقه مورد مطالعه.....
۶	۷-۱ تاریخچه معدنکاری در منطقه.....
۷	۱-۷-۱ معدن چغارت.....
۷	۲-۷-۱ معدن سه‌چاهون.....
۷	۳-۷-۱ معدن چادرملو.....
۸	۴-۷-۱ معدن فسفات اسفوردی.....
۸	۸-۱ مطالعات پیشین.....
۱۴	۹-۱ رده‌بندی انواع کانسارهای عناصر خاکی کمیاب.....
۱۵	۱۰-۱ طرح مسئله و هدف از مطالعه.....
۱۵	۱۱-۱ روش مطالعه.....
۱۵	۱-۱۱-۱ مطالعات صحرایی.....
۱۶	۲-۱۱-۱ مطالعات آزمایشگاهی و دفتری.....
۱۸	۱۲-۱ طرح کلی محتوای رساله.....
۲۱	فصل دوم: زمین‌شناسی.....
۲۲	۱-۲ مقدمه.....
۲۳	۲-۲ زمینشناسی ناحیه ای.....
۲۳	۱-۲-۲ زمینشناسی پهنه ایران مرکزی.....
۲۵	۲-۲-۲ زمینشناسی بلوک پشت بادام و منطقه فلززایی بافق.....
۳۰	۳-۲ زمینشناسی مناطق معدنی.....
۳۰	۱-۳-۲ مقدمه.....
۳۱	۲-۳-۲ زمینشناسی منطقه معدنی اسفوردی.....
۳۲	۱-۲-۳-۲ سازندهای زمینشناسی پرکامبرین بالایی - کامبرین زیرین (سری ریزو).....
۳۹	۲-۲-۳-۲ سنگهای نفوذی منطقه معدنی اسفوردی.....
۴۲	۳-۳-۲ زمینشناسی منطقه معدنی گزستان.....
۴۳	۱-۳-۳-۲ سازندهای زمینشناسی پرکامبرین بالایی - کامبرین زیرین (سری ریزو).....

۴۹	.....	۲-۳-۳-۲- سنگهای نفوذی منطقه معدنی گزستان
۵۰	.....	۴-۳-۲- زمینشناسی منطقه معدنی لکه‌سیاه
۵۰	.....	۲-۳-۴-۱- سازندهای زمینشناسی پرکامبرین بالایی - کامبرین زیرین (سری ریزو)
۵۱	.....	۲-۴-۳-۲- سنگهای نفوذی منطقه معدنی لکه‌سیاه
۵۴	.....	۲-۳-۵- زمینشناسی منطقه معدنی چغارت
۵۵	.....	۲-۳-۵-۱- واحدهای سنگی سری ریزو
۵۶	.....	۲-۳-۵-۲- سنگهای نفوذی منطقه معدنی چغارت
۵۹	.....	فصل سوم: سنگ نگاری
۶۰	.....	۳-۱- مقدمه
۶۱	.....	۳-۲- سنگهای رسوبی
۶۲	.....	۳-۲-۱- دولومیت
۶۴	.....	۳-۲-۲- ماسه‌سنگ
۶۵	.....	۳-۳- سنگهای آذرآواری
۶۶	.....	۳-۳-۱- توف ریولیتی
۶۷	.....	۳-۳-۲- توف داسیتی
۶۸	.....	۳-۳-۳- توف ریوداسیتی
۶۹	.....	۳-۴- گدازه‌های آتشفشانی
۷۰	.....	۳-۴-۱- بازالت
۷۱	.....	۳-۴-۲- بازالت آندزیتی
۷۲	.....	۳-۵- سنگهای نفوذی
۷۳	.....	۳-۵-۱- مونزونیت
۷۵	.....	۳-۵-۲- دیوریت
۷۶	.....	۳-۵-۳- مونزوسینیت
۷۸	.....	۳-۵-۴- سینیت
۷۹	.....	۳-۵-۵- آپلیت گرانیتی
۸۰	.....	۳-۶- متاسوماتیت‌ها
۸۳	.....	۳-۷- اسکارنها
۸۵	.....	فصل چهارم: کانی شناسی، ساخت، بافت و توالی پاراژنتیکی کانی‌ها
۸۶	.....	۴-۱- مقدمه
۸۷	.....	۴-۲- شکل‌های مختلف کانه‌زائی در منطقه فلززائی بافق
۸۷	.....	۴-۲-۱- ساخت و بافت لامینه‌های (نواری)
۸۹	.....	۴-۲-۲- ساخت و بافت توده‌های
۹۵	.....	۴-۲-۳- ساخت و بافت رگه-رگچه‌های

۹۷	۴-۲-۴ ساخت و بافت داربستی.....
۹۸	۵-۲-۴ ساخت و بافت دانه پراکنده.....
۹۹	۶-۲-۴ ساخت و بافت پرکننده فضای بین قطعات و حفرات.....
۹۹	۷-۲-۴ ساخت و بافت برشی.....
۱۰۰	۳-۴ کانیشناسی و توالی پاراژنری کانی‌ها در کانسارهای منطقه بافق.....
۱۰۱	۱-۳-۴ کانه‌زائی آهن - منگنز نواری.....
۱۰۵	۲-۳-۴ کانه‌زائی آهن - آپاتیت ماگمایی - گرمابی.....
۱۱۷	فصل پنجم: زمین شیمی سنگ کل.....
۱۱۸	۱-۵ مقدمه.....
۱۱۸	۲-۵ نمونه برداری و تجزیه شیمیایی نمونه‌ها.....
۱۱۹	۳-۵ پردازش داده‌های ژئوشیمیایی.....
۱۱۹	۱-۳-۵ جایگزینی داده‌های سنسورد.....
۱۲۱	۲-۳-۵ ارزیابی دقت و صحت داده‌های ژئوشیمیایی.....
۱۲۸	۴-۵ ژئوشیمی سنگ‌های منطقه بافق.....
۱۳۱	۱-۴-۵ طبقه‌بندی شیمیایی سنگ‌ها.....
۱۴۵	فصل ششم: زمین شیمی کانسنگ.....
۱۴۶	۱-۶ ژئوشیمی کانسنگ‌های منطقه بافق.....
۱۴۸	۱-۱-۶ بررسی تغییرات مقادیر غلظت عناصر در نمونه‌های کانسنگ.....
۱۴۸	۲-۱-۱-۶ تغییرات غلظت عناصر در محدوده اسفوردی.....
۱۵۰	۳-۱-۱-۶ تغییرات غلظت عناصر در محدوده گزستان.....
۱۵۲	۴-۱-۱-۶ تغییرات غلظت عناصر در محدوده لکه‌سیاه.....
۱۵۳	۵-۱-۱-۶ تغییرات غلظت عناصر در محدوده چغارت.....
۱۵۵	۶-۱-۱-۶ مقایسه غلظت عناصر آهن، فسفر، خاک‌های کمیاب و وانادیم در کانسارهای منطقه بافق.....
۱۵۶	۲-۶ الگوهای به‌هنجار شده غلظت عناصر در نمونه‌های کانسنگ نسبت به نمونه‌های مرجع.....
۱۵۷	۱-۲-۶ نمودارهای عنکبوتی و به‌هنجار شده به گوشته اولیه.....
۱۶۰	۲-۲-۶ نمودارهای عنکبوتی و به‌هنجار شده به کندریت.....
۱۶۳	۳-۲-۶ نمودارهای عنکبوتی به‌هنجار شده به پوسته قاره‌ای بالایی.....
۱۶۴	۴-۲-۶ الگوی به‌هنجار شده عناصر کمیاب خاکی کانسنگ‌های منطقه فلززائی بافق به کندریت.....
۱۶۵	۵-۲-۶ مقایسه الگوی توزیع مقایسه الگوی توزیع عناصر کمیاب خاکی کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت منطقه بافق با کانسارهای مشابه در جهان.....
۱۶۷	۳-۶ بررسی نسبت‌های عنصری در کانسنگ‌های منطقه بافق.....
۱۷۳	فصل هفتم: مطالعه میانبارهای سیال.....
۱۷۴	۱-۷ مقدمه.....

۱۷۴	۲-۷- روش نمونه برداری و آماده‌سازی نمونه‌ها.....
۱۷۶	۳-۷- پتروگرافی میانبارهای سیال.....
۱۷۸	۴-۷- مطالعات میکروترمومتری میانبارهای سیال.....
۱۸۰	۱-۴-۷- دمای به دام افتادن میانبارهای سیال.....
۱۸۰	۲-۴-۷- شوری سیالات.....
۱۸۱	۳-۴-۷- تغییرات چگالی و تکامل سیال کانهدار با استفاده از نمودار خطوط هم‌چگال.....
۱۸۴	۴-۴-۷- عمق.....
۱۸۵	۵-۴-۷- تعیین منشا سیالات مولد کانه ساز در کانهای آهن- آپاتیت.....
۱۸۹	فصل هشتم: نتیجه گیری، تیپ و الگوی تشکیل کانسار و پیشنهادها.....
۱۹۰	۱-۸- مقدمه.....
۱۹۰	۲-۸- زمینشناسی و سنگشناسی.....
۱۹۲	۳-۸- کانهنگاری، ساخت، بافت و توالی پاراژنزی کانیهها.....
۱۹۶	۴-۸- زمینشیمی سنگهای آذرین.....
۱۹۹	۵-۸- زمینشیمی کانسنگ.....
۲۰۱	۶-۸- میانبارهای سیال.....
۲۰۲	۷-۸- کانسارهای آهن.....
۲۰۷	۸-۸- مراحل تشکیل کانه‌زایی اکسیدهای آهن-آپاتیت در منطقه فلززائی بافق.....
۲۱۳	۹-۸- نتیجه گیری.....
۲۱۵	۱۰-۸- پیشنهادها.....
۲۱۷	منابع.....

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: موقعیت جغرافیایی و راههای دسترسی به محدوده..... ۳
- شکل ۱-۲: الف) نمایی از پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه ب) تصویری از شتر در دشت زیرگان..... ۴
- شکل ۱-۳: نمایی از زمین‌ریخت‌شناسی منطقه مورد مطالعه..... ۶
- شکل ۱-۲: موقعیت منطقه مورد مطالعه (مستطیل آبی رنگ) در نقشه ساختاری- رسوبی ایران..... ۲۲
- شکل ۲-۲: نقشه ساختاری بلوک فلز زائی پشت بادام..... ۳۰
- شکل ۲-۳: نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه برگرفته از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ راور..... ۳۱
- شکل ۲-۴: نقشه زمین‌شناسی منطقه معدنی اسفوردی، با تغییر از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰..... ۳۲
- شکل ۲-۵: توالی از دولومیت مرمری شده، سنگهای متاسوماتیتی به همراه افقهای منگنز و آهن..... ۳۳
- شکل ۲-۶: مرز میان واحد مرمر دولومیتی شده با ماسه‌سنگ کوارتزیتی در سری رسوبی- آتشفشانی ریزو..... ۳۴
- شکل ۲-۷: الف) رخنمون لایه بازالتی به ضخامت ۴ متر در میان دولومیت، ماسه سنگ و توف شیلی..... ۳۵
- شکل ۲-۸: گدازه ریولیتی به همراه سنگ‌آهک و متاسوماتیت‌ها دارای کانه‌زائی آپاتیت..... ۳۶
- شکل ۲-۹: الف) افقهای آهن و منگنز در توالی دولومیتها..... ۳۷
- شکل ۲-۱۰: الف) توالی ژاسپیلیت با اکسیدهای منگنز - آهن نواری..... ۳۸
- شکل ۲-۱۱: الف) بخش غنی از آپاتیت در داخل سنگهای سبز..... ۳۹
- شکل ۲-۱۲: الف) رخنمون گسترده توده سینیتی در منطقه مورد مطالعه..... ۴۰
- شکل ۲-۱۳: تماس توده سینیتی با دولومیت‌های مرمری شده و متاسوماتیت‌ها..... ۴۱
- شکل ۲-۱۴: توالی دولومیت، متاسوماتیت‌ها، و گدازه بازالتی که در داخل آنها دایکهای آپلیت گرانیت..... ۴۲
- شکل ۲-۱۵: نقشه زمین‌شناسی منطقه معدنی گزستان..... ۴۳
- شکل ۲-۱۶: توالی از شیل، ماسه سنگ، دولومیت، متاسوماتیت و سنگهای آتشفشانی در سری ریزو..... ۴۴
- شکل ۲-۱۷: الف) تماس متاسوماتیتها با توفهای ریولیتی، داسیتی..... ۴۵
- شکل ۲-۱۸: تصویری از منطقه معدنی گزستان که همبری متاسوماتیت‌ها، گدازه‌های بازالتی..... ۴۶
- شکل ۲-۱۹: توف داسیتی که در مرز متاسوماتیتها و دولومیت و آهک دولومیتی..... ۴۷
- شکل ۲-۲۰: مرز گسلی میان متاسوماتیتها با دولومیت و آهکهای دولومیتی..... ۴۸
- شکل ۲-۲۱: الف) کانه‌زایی توده‌ای مگنتیت-آپاتیت در متاسوماتیتها..... ۴۸
- شکل ۲-۲۲: رخنمون توده دیوریتی در متاسوماتیت‌های منطقه گزستان..... ۴۹
- شکل ۲-۲۳: نقشه زمین‌شناسی منطقه معدنی لکه‌سیاه با تغییر از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰..... ۵۰
- شکل ۲-۲۴: الف) توفهای ریولیتی تشکیل شده به همراه سنگهای متاسوماتیتی در بخشهای بالایی سری..... ۵۱
- شکل ۲-۲۵: الف و ب) تشکیل سنگ‌های اسکارنی و آهن اسکارنی در تماس مونزونیت با دولومیت،..... ۵۳
- شکل ۲-۲۶: الف) توده‌ای از مگنتیت که در تماس با مونزوسینیت..... ۵۴
- شکل ۲-۲۷: الف) نقشه زمین‌شناسی معدن چغارت..... ۵۵
- شکل ۲-۲۸: الف) کانه‌زایی آهن چغارت در توالی‌های سنگی سری ریزو..... ۵۶

- شکل ۲-۲۹: الف) نفوذ توده سینیت در مجاورت متاسوماتیت‌های معدن چغارت..... ۵۷
- شکل ۳-۱: الف) تصویر نمونه دستی دولومیت، که از منطقه اسفوردی..... ۶۳
- شکل ۳-۲: الف) تصویری از بلورهای لوزوجهی دولومیت..... ۶۴
- شکل ۳-۳: الف) تصویری از نمونه دستی متاگزیوک که از منطقه اسفوردی..... ۶۵
- شکل ۳-۴: الف) تصویری از حضور بلورهای کوارتز در یک زمینه دانه ریز از نمونه ماسه سنگ گریوک..... ۶۵
- شکل ۳-۵: الف) تصویر از نمونه دستی توف ریولیتی که از منطقه گزستان..... ۶۷
- شکل ۳-۶: الف) تصویری از نمونه دستی توف داسیتی که از منطقه گزستان..... ۶۸
- شکل ۳-۷: الف) تصویری از رگه‌های کلسیت، کوارتز به همراه کانیهای کدر..... ۶۸
- شکل ۳-۸: الف) تصویری از نمونه دستی توف ریوداسیتی که از منطقه گزستان..... ۶۹
- شکل ۳-۹: الف) تصویری از بافت ریز دانه توف ریولیتی..... ۶۹
- شکل ۳-۱۰: الف) تصویری از نمونه دستی بازالت که از منطقه اسفوردی..... ۷۱
- شکل ۳-۱۱: الف) تصویر میکروسکوپی از تیغکهای مگنتیت..... ۷۱
- شکل ۳-۱۲: الف) تصویر نمونه دستی از بازالت آندزیتی که از منطقه گزستان..... ۷۲
- شکل ۳-۱۳: الف) تصویر میکروسکوپی از پلاژیوکلازها در نمونه بازالت آندزیتی..... ۷۲
- شکل ۳-۱۴: الف) تصویری از نمونه دستی مونزونیت که از منطقه لکه سیاه..... ۷۴
- شکل ۳-۱۵: الف) تصویری از حضور بیوتیت، آپاتیت، زیرکن، کلریت، و اپاک..... ۷۴
- شکل ۳-۱۶: الف) تصویری از نمونه دستی دیوریت که از منطقه گزستان..... ۷۵
- شکل ۳-۱۷: الف) تصویری از حضور کانیهای پیروکسن، هورنبلند و کوارتز در نمونه دیوریتی منطقه..... ۷۶
- شکل ۳-۱۸: الف) تصویری از نمونه دستی مونزوسینیتی که از منطقه اسفوردی..... ۷۷
- شکل ۳-۱۹: الف) تصویر میکروسکوپی از کانیهای بیوتیت و هورنبلند..... ۷۷
- شکل ۳-۲۰: الف) تصویر نمونه دستی مونزوسینیتی که از منطقه لکه سیاه..... ۷۷
- شکل ۳-۲۱: الف) تصویری از حضور آمفیبولهای کلریتی شده و کانیهای ثانویه..... ۷۸
- شکل ۳-۲۲: الف) تصویری از نمونه دستی سینیت که از منطقه اسفوردی..... ۷۹
- شکل ۳-۲۳: الف) تصویری از حضور هورنبلند، پلاژیوکلازهای سریسیتی شده به همراه دگرسانیهای..... ۷۹
- شکل ۳-۲۴: الف) تصویری از نمونه دستی آپلیت گرانیت که از منطقه اسفوردی..... ۸۰
- شکل ۳-۲۵: الف) تصویر میکروسکوپی حضور کانیهای کوارتز و آلکالی فلدسپار در نمونه آپلیت گرانیتی..... ۸۰
- شکل ۳-۲۶: الف) تصویری از نمونه دستی سنگ متاسوماتیتی از منطقه اسفوردی..... ۸۲
- شکل ۳-۲۷: الف) تصویری از اجتماع اکسیدهای آهن (مگنتیت)..... ۸۲
- شکل ۳-۲۸: الف) تصویری از بلورهای آپاتیت و مگنتیت..... ۸۳
- شکل ۳-۲۹: الف) تصویری از نمونه دستی اسکارن که از منطقه چغارت..... ۸۴
- شکل ۳-۳۰: الف) تصویری از هم‌رشدی کانیهای آمفیبول و کلسیت..... ۸۴
- شکل ۴-۱: الف) تصویری از کانهزایی منگنز - آهن به شکل لامینه‌ای..... ۸۸
- شکل ۴-۲: الف) تصویری از توالی سری ریزو در منطقه اسفوردی..... ۸۸



- شکل ۴-۳: الف و ب) تصویری از کانه‌زائی لامینه‌ای (نواری) آهن..... ۸۹
- شکل ۴-۴: الف) کانه‌زایی توده‌های آپاتیت در داخل سنگ‌های متاسوماتیتی میزبان در معدن اسفوردی..... ۹۰
- شکل ۴-۵: الف) رخنمون کانسنگ مگنتیت (آپاتیت) توده‌های در سنگ‌های متاسوماتیتی میزبان در منطقه..... ۹۱
- شکل ۴-۶: الف) تصویری از کانه‌زایی توده‌های مگنتیت (آپاتیت) در معدن لکه‌سیاه..... ۹۲
- شکل ۴-۷: الف) تصویری از معدن چغارت که در آن کانه‌زایی توده‌های آپاتیتها..... ۹۳
- شکل ۴-۸: الف) کانه‌زایی آپاتیت و مگنتیت که به صورت دایک در میان متاسوماتیت‌ها در منطقه گزستان..... ۹۴
- شکل ۴-۹: الف و ب) بلورهای درشت و صورتی رنگ آپاتیت..... ۹۵
- شکل ۴-۱۰: تصویری از کانه‌زایی رگه-رگچه‌های آپاتیت و مگنتیت در داخل سنگ‌های متاسوماتیتی..... ۹۶
- شکل ۴-۱۱: الف) تصویر صحرایی از کانه‌زایی مگنتیت و مگنتیت هماتیته شده..... ۹۶
- شکل ۴-۱۲: الف) تزریق رگه و رگچه‌های نامنظم اکسیدهای منگنز و آهن به درون سنگ میزبان ریولیتی..... ۹۷
- شکل ۴-۱۳: الف) تصویر نمونه دستی از کانه‌زایی آپاتیت به صورت دانه‌پراکنده در متاسوماتیت‌های..... ۹۸
- شکل ۴-۱۴: الف) مگنتیت و هماتیت که حفره متاکربنات‌ها را در منطقه لکه‌سیاه..... ۹۹
- شکل ۴-۱۵: الف) ب) کانه‌زایی فرم برشی در منطقه گزستان..... ۱۰۰
- شکل ۴-۱۶: الف) نمونه دستی از کانسنگ غنی از اسپیکولاریت و هماتیت از منطقه اسفوردی..... ۱۰۲
- شکل ۴-۱۷: الف) تصویر نمونه دستی کانسنگ منگنز - آهن که از منطقه اسفوردی..... ۱۰۳
- شکل ۴-۱۸: الف) همیافتی پسیلوملان با اسپیکولاریت و گوئیت در کانسنگ‌های منگنز - آهن نواری..... ۱۰۴
- شکل ۴-۱۹: الف) تصویر نمونه دستی کانسنگ مگنتیتی از منطقه لکه‌سیاه..... ۱۰۶
- شکل ۴-۲۰: الف) تصویر صحرایی از نسل سوم کانه‌زایی مگنتیت..... ۱۰۷
- شکل ۴-۲۱: الف) تصویر نمونه دستی کانسنگ آپاتیتی که از منطقه اسفوردی..... ۱۰۸
- شکل ۴-۲۲: الف) تصویر نمونه دستی از کانه‌زایی اکسید آهنی - سولفیدی که از منطقه چغارت..... ۱۰۹
- شکل ۴-۲۳: تصویر میکروسکوپی که بیانگر هماتیته شدن بلورهای مگنتیت..... ۱۱۰
- شکل ۴-۲۴: تصویر میکروسکوپی از اکتینولیت‌های دندریتی..... ۱۱۱
- شکل ۴-۲۵: تصویر میکروسکوپی از کانی بروسیت که به صورت رشته‌ای..... ۱۱۱
- شکل ۴-۲۶: الف) تصویر میکروسکوپی از اپیدوت در کنار آپاتیت از کانسار اسفوردی..... ۱۱۲
- شکل ۴-۲۷: الف) کانی کلسیت که بلورهای مگنتیت..... ۱۱۳
- شکل ۴-۲۸: الف) تصویر صحرایی از آغشتگی گوئیت، لیمونیت و هماتیت در سنگ میزبان توف ریولیتی..... ۱۱۵
- شکل ۵-۱: طبقه‌بندی سنگ‌های آتشفشانی..... ۱۳۲
- شکل ۵-۲: طبقه‌بندی سنگ‌های آتشفشانی..... ۱۳۳
- شکل ۵-۳: الف، ب، پ) الگوهای به‌هنجار شده مقادیر عناصر کمیاب سنگ‌های آتشفشانی به ترکیب..... ۱۳۵
- شکل ۵-۴: طبقه‌بندی سنگ‌های نفوذی..... ۱۳۶
- شکل ۵-۵: طبقه‌بندی سنگ‌های نفوذی منطقه مورد مطالعه با استفاده از نمودار..... ۱۳۷
- شکل ۵-۶: طبقه‌بندی سنگ‌های نفوذی..... ۱۳۸
- شکل ۵-۷: الگوهای به‌هنجار شده مقادیر عناصر کمیاب سنگ‌های نفوذی منطقه بافق به ترکیب گوشته..... ۱۳۹

- شکل ۵-۸: الگوی به‌هنجار شده توزیع عناصر کمیاب خاکی..... ۱۴۰
- شکل ۵-۹: تعیین ماهیت زمین‌شیمیایی سنگ‌های آذرین منطقه..... ۱۴۱
- شکل ۵-۱۰ (الف): تعیین میزان آلکالینیته و جنس سنگهای منطقه..... ۱۴۲
- شکل ۵-۱۱: تعیین محیط تکتونیکی سنگهای آتشفشانی منطقه..... ۱۴۳
- شکل ۵-۱۲: الگوی به‌هنجار شده توزیع عناصر کمیاب خاکی در دولومیت‌های منطقه..... ۱۴۴
- شکل ۶-۱: تغییرات مقادیر غلظت عناصر در کانسنگ‌های مگنتیتی، مگنتیت-آپاتیتی و آپاتیتی محدوده... ۱۵۰
- شکل ۶-۲: تغییرات مقادیر غلظت عناصر در کانسنگ‌های مگنتیتی و مگنتیت-آپاتیتی محدوده گزستان... ۱۵۲
- شکل ۶-۳: تغییرات مقادیر غلظت عناصر در کانسنگ مگنتیتی محدوده لکه‌سیاه:..... ۱۵۳
- شکل ۶-۴: تغییرات مقادیر غلظت عناصر در کانسنگ‌های مگنتیتی و مگنتیت-آپاتیتی محدوده چغارت..... ۱۵۴
- شکل ۶-۵: مقایسه مقادیر عناصر کمیاب خاکی و وانادیم میان کانسنگ‌های مگنتیتی و مگنتیت-آپاتیت... ۱۵۶
- شکل ۶-۶: الگوی به‌هنجار شده غلظت عناصر کمیاب و کمیاب خاکی متوسط کانسنگ‌های مگنتیت..... ۱۶۰
- شکل ۶-۷: الگوی به‌هنجار شده غلظت عناصر اصلی، کمیاب و کمیاب خاکی متوسط..... ۱۶۱
- شکل ۶-۸: الگوی به‌هنجار شده غلظت عناصر کمیاب خاکی متوسط..... ۱۶۳
- شکل ۶-۹: الگوی به‌هنجار شده غلظت عناصر اصلی، کمیاب و کمیاب خاکی متوسط..... ۱۶۴
- شکل ۶-۱۰: الگوی به‌هنجار شده غلظت عناصر کمیاب خاکی..... ۱۶۵
- شکل ۶-۱۱: الگوی به‌هنجار شده عناصر کمیاب خاکی..... ۱۶۷
- شکل ۶-۱۲ (الف): نمودار Co در مقابل Ni..... ۱۶۹
- شکل ۶-۱۳ (الف): موقعیت مگنتیت‌های منطقه در نمودار Ni/Ti نسبت به V/Ti..... ۱۷۰
- شکل ۶-۱۴: نمودار مثلثی Mg-V-Mn..... ۱۷۰
- شکل ۶-۱۵: نمودار غلظت V در برابر Ti..... ۱۷۱
- شکل ۶-۱۶: نمودار متمایز کننده انواع کانسارهای آهن..... ۱۷۲
- شکل ۷-۱ (الف): تصویری از نمونه دستی کانسنگ آپاتیتی که از معدن چغارت برداشت شده است..... ۱۷۵
- شکل ۷-۲: هیستوگرام فراوانی اندازه میانبارهای سیال..... ۱۷۸
- شکل ۷-۳: انواع میانبارهای سیال به همراه اشکال مختلف حضور آنها..... ۱۷۸
- شکل ۷-۴ (الف و ب): هیستوگرامهای فراوانی دمای همگن شدن و میزان شوری..... ۱۸۱
- شکل ۷-۵: چگالی میانبارهای مورد مطالعه بر حسب..... ۱۸۳
- شکل ۷-۶: تعیین فشار بخار بر اساس دمای همگن شدن و میزان شوری..... ۱۸۳
- شکل ۷-۷ (الف): نمودار دما-فشار-عمق جهت تعیین عمق..... ۱۸۵
- شکل ۷-۸: تشخیص نوع سیالات کانسیساز با استفاده از میزان شوری..... ۱۸۶
- شکل ۷-۹: موقعیت قرارگیری نمونه‌های مربوط به منطقه مورد مطالعه در نمودار شوری در مقابل..... ۱۸۷
- شکل ۸-۱: مراحل مختلف تشکیل و پیدایش منطقه فلززایی بافق از دیدگاه زمینشناسی..... ۲۱۰
- شکل ۸-۲: مدل شماتیک نحوه تشکیل کانسارهای نوع IOA و IOCG با تغییرات از..... ۲۱۱
- شکل ۸-۳: مدل شماتیک تشکیل مگنتیت در کانسارهای اکسید آهن آپاتیت تیپ کایرونا..... ۲۱۳

## فهرست جداول

- جدول ۱-۱: رده‌بندی انواع کانسارهای عناصر خاکی کمیاب..... ۱۵
- جدول ۱-۲: مقدار حد قابل ثبت بالا و پایین برای عناصر اصلی برحسب درصد، کمیاب و خاکی کمیاب ..... ۱۷
- جدول ۱-۳: علائم اختصاری مورد استفاده در تصاویر شکل‌های این فصل..... ۶۱
- جدول ۲-۳: شماره، مختصات مکانی، کانی‌های سازنده و نام سنگهای نمونه‌های منتخب رسوبی..... ۶۱
- جدول ۳-۳: شماره، مختصات مکانی، کانی‌های سازنده و نام سنگهای منتخب از نمونه‌های آذرآواری منطقه. ۶۶
- جدول ۴-۳: شماره، مختصات مکانی، کانی‌های سازنده و نام نمونه‌های منتخب سنگ‌های گدازه‌ای ..... ۷۰
- جدول ۵-۳: شماره، مختصات مکانی، کانی‌های سازنده و نام سنگ نمونه‌های منتخب سنگ‌های نفوذی..... ۷۳
- جدول ۶-۳: شماره، مختصات مکانی، کانی‌های سازنده و نام سنگ نمونه‌های منتخب از متاسوماتیت‌ها..... ۸۱
- جدول ۷-۳: شماره، مختصات مکانی، کانی‌های سازنده و نام سنگ نمونه‌های منتخب از سنگ‌های اسکارن..... ۸۳
- جدول ۱-۴: توالی پاراژنزی کانهبازی آهن نواری منطقه معدنی بافق..... ۱۰۴
- جدول ۲-۴: توالی پاراژنزی کانهبازی آهن - آپاتیت منطقه معدنی بافق..... ۱۱۶
- جدول ۱-۵: تعداد و درصد فراوانی نمونه‌های دارای مقادیر سنسورد و مقدار جایگزینی برای پاره‌ای از ..... ۱۲۰
- جدول ۲-۵: تعداد و درصد فراوانی نمونه‌های دارای مقادیر سنسورد و مقدار جایگزینی برای پاره‌ای از..... ۱۲۰
- جدول ۳-۵: نتایج تجزیه نمونه‌های توخالی برای ارزیابی صحت روش‌های دستگاهی در تجزیه نمونه..... ۱۲۲
- جدول ۴-۵: نتایج تجزیه مکرر نمونه استاندارد برای ارزیابی صحت روش‌های دستگاهی در تجزیه نمونه..... ۱۲۴
- جدول ۵-۵: نتایج تجزیه جفت نمونه‌های اصلی و تکراری و درصد خطا برای اندازه‌گیری اکسید عناصر..... ۱۲۶
- جدول ۶-۵: نتایج تجزیه جفت نمونه‌های اصلی و تکراری و درصد خطا در اندازه‌گیری عناصر فرعی..... ۱۲۶
- جدول ۷-۵: ادامه نتایج تجزیه جفت نمونه‌های اصلی و تکراری و درصد خطا در اندازه‌گیری عناصر ..... ۱۲۷
- جدول ۸-۵: ادامه نتایج تجزیه جفت نمونه‌های اصلی و تکراری و درصد خطا در اندازه‌گیری عناصر ..... ۱۲۷
- جدول ۹-۵: مقادیر غلظت اکسیدهای عناصر اصلی (درصد وزنی)، عناصر فرعی، کمیاب و کمیاب..... ۱۲۹
- جدول ۱-۶: مقادیر غلظت اکسید عناصر اصلی (درصد وزنی)، عناصر فرعی، کمیاب و کمیاب خاکی..... ۱۴۷
- جدول ۱-۷: ویژگیهای کانیشناسی نمونه‌های انتخاب شده برای مطالعه میانبارهای سیال..... ۱۷۵
- جدول ۲-۷: نتایج مطالعات میکروترموتری میانبارهای سیال آپاتیت‌های نسل اول در منطقه معدنی ..... ۱۷۹
- جدول ۳-۷: نتایج مطالعات میکروترموتری میانبارهای سیال آپاتیت‌های نسل دوم در منطقه معدنی ..... ۱۷۹
- جدول ۴-۷: نتایج میکروترموتری در کانسنگهای مگنتیت و آپاتیت منطقه معدنی بافق..... ۱۸۷
- جدول ۱-۸: طبقه‌بندی کانسارهای اکسید آهن ماگمایی - گرمابی و کانسارهای مس - طلا مرتبط با ..... ۲۰۳
- جدول ۲-۸: ویژگیهای اصلی کانسارهای مگنتیت - آپاتیت منطقه مورد مطالعه با کانسارهای مگنتیت ..... ۲۰۴
- جدول ۳-۸: مقایسه ویژگیهای اصلی کانسار مگنتیت - آپاتیت منطقه معدنی بافق با کانسارهای آهن..... ۲۰۵
- جدول ۴-۸: مقایسه ویژگیهای اصلی کانسار مگنتیت - آپاتیت منطقه معدنی بافق با کانسارهای آهن..... ۲۰۶

علائم اختصاری مورد استفاده در تصاویر شکل‌های این پژوهش (Whitney and Evans, 2010)

نام گانی	علامت اختصاری	نام گانی	علامت اختصاری
کلسیت	<b>Cal</b>	دولومیت	<b>Dol</b>
کوارتز	<b>Qz</b>	اپک	<b>Opq</b>
مگنتیت	<b>Mag</b>	آلکالی فلدسپات	<b>Afs</b>
اپیدوت	<b>Ep</b>	سریسیت	<b>Ser</b>
پلاژیوکلاز	<b>Pl</b>	پیروکسن	<b>Px</b>
بیوتیت	<b>Bt</b>	آپاتیت	<b>Ap</b>
اسفن	<b>Spn</b>	کلریت	<b>Chl</b>
هورنبلند	<b>Hbl</b>	آمفیبول	<b>Amp</b>
آنیت	<b>Ann</b>	گارنت	<b>Grt</b>
مسکویت	<b>Ms</b>	هماتیت	<b>Hem</b>
اکتینولیت	<b>Act</b>	ترمولیت	<b>Tr</b>

فصل اول

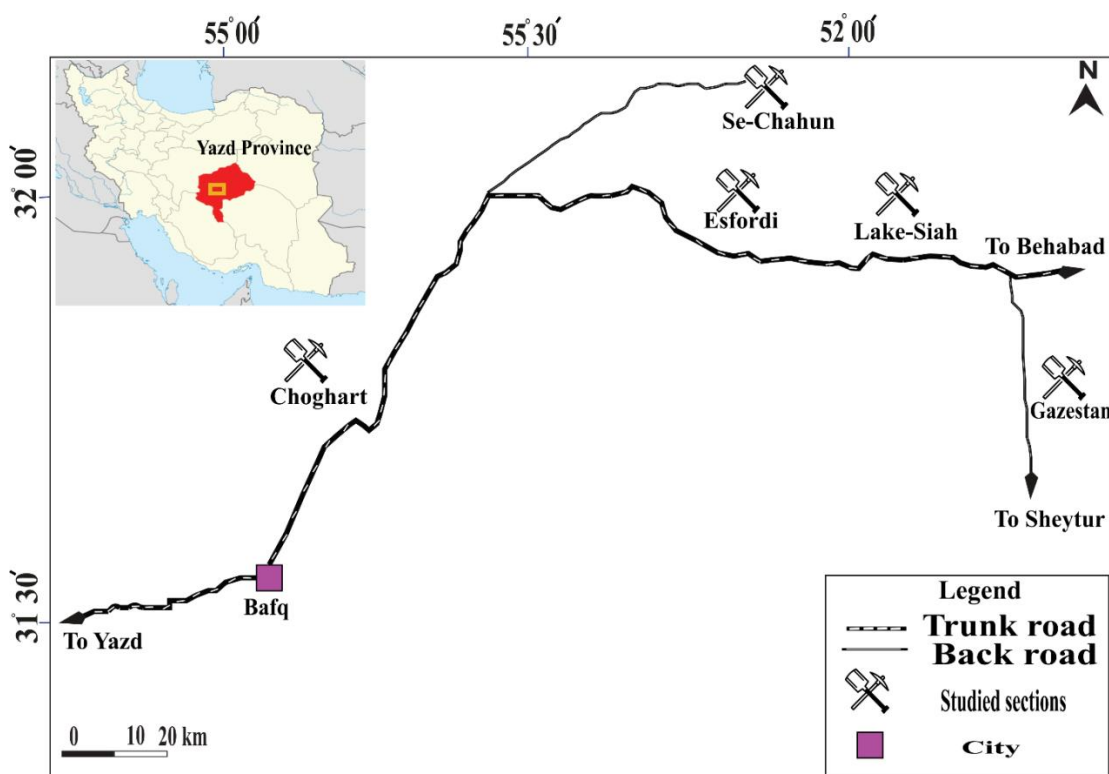
کلیات

## ۱-۱ مقدمه

عناصر خاکی کمیاب گروهی از ۱۷ فلز که شامل ۱۵ لانتانید ( $La^{57}$  تا  $Lu^{71}$ ) به همراه اسکاندیوم و ایتریوم هستند که در گروه سوم جدول تناوبی قرار گرفته‌اند و همگی خواص فیزیکی و شیمیایی یکسانی از خود نشان می‌دهند. به دلیل بروز رفتار فیزیکوشیمیایی یکسان در طول فرایندهای زمین-شناسی این عناصر در مباحث مربوط به منشاء سنگ‌ها و کانسار می‌توانند حائز اهمیت باشند. از آنجا که جهان به سمت آینده‌ای پاک‌تر و سبزتر پیش می‌رود، کاربرد این مواد به سرعت رو به افزایش است. خودروهای هیبریدی، توربین‌های بادی و ماشین‌آلاتی از این قبیل همگی نیاز به عناصر خاکی کمیاب دارند. همچنین ساخت محصولات جدید نظیر دستگاه‌های خنک‌کننده و الکتربکی نیز که مقادیر زیادی از عناصر خاکی کمیاب را مورد استفاده قرار می‌دهند، مطرح هستند. با در نظر گرفتن این ویژگی‌ها مطالعه‌ی زمین‌شناسی و اکتشاف عناصر خاکی کمیاب حائز اهمیت است. در ایران مطالعات زمین‌شناسی و اکتشافی سامان‌مند برای عناصر خاکی کمیاب انجام نشده است با این وجود داده‌های زمین‌شناسی و معدنی موجود، بلوک پشت بادام را برای پی‌جویی عناصر خاکی کمیاب مستعد نشان می‌دهد. در ارتباط با متالورژی خاک‌های کمیاب در این بلوک کارهایی انجام شده و این کارها تمرکز و عیار بالای خاک‌های نادر را در بخش آپاتیتی این کانسارها نشان می‌دهد. نتیجه‌ی این مطالعات پتانسیل بالای منطقه‌ی بافق- اسفوردی را نسبت به خاک‌های کمیاب نشان می‌دهد. با توجه به اهمیتی که منطقه بافق- اسفوردی برای کانه‌زایی خاک‌های کمیاب دارد، زمین‌شیمی و کانی-شناسی عناصر خاکی کمیاب در منطقه بافق- اسفوردی برای موضوع پایان‌نامه حاضر تعریف شده است. در این پژوهش، مطالعات زمین‌شناسی، سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و میانبارسیال بر روی کانسنگ‌ها و سنگ‌های میزبان در محدوده‌های کانسارهای اسفوردی، گزستان، لکه‌سیاه و چغارت انجام شده است که در ادامه با جزییات توصیف خواهند شد.

## ۲-۱ موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه و راه‌های دسترسی

شهرستان بافق به مرکزیت شهر بافق با مساحتی حدود ۱۷۸۵۰ کیلومترمربع، به فاصله ۱۲۰ کیلومتر در جنوب شرقی شهرستان یزد، در طول جغرافیایی  $55^{\circ}38'$  شرقی و عرض  $31^{\circ}47'$  واقع شده است. این شهرستان به وسیله راه آهن و راه آسفالتی منشعب از یزد قابل دسترسی است. از دیگر راه‌های ارتباطی می‌توان به محورهای بافق- بهاباد، بافق- شیپور و بافق- معدن چادرملو اشاره کرد (شکل ۱-۱).



شکل ۱-۱: موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به محدوده مورد مطالعه اکتباس از (سحاب، ۱۳۸۹)

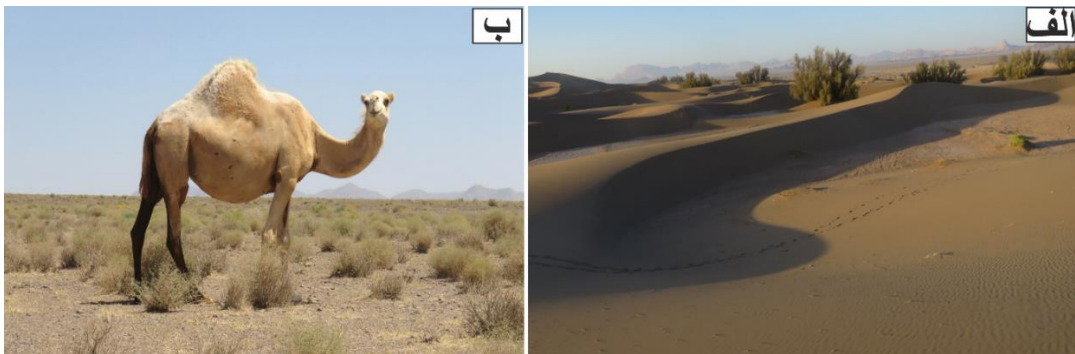
## ۳-۱ شرایط آب و هوایی منطقه

منطقه مورد مطالعه با آب و هوای گرم و خشک و بارندگی ناچیز به عنوان یک منطقه صحرائی محسوب می‌شود. بر اساس آمار ایستگاه‌های هواشناسی، درجه حرارت در زمستان حداقل  $9/6$  و در تابستان  $45$  درجه سانتی‌گراد و متوسط میزان بارندگی در سال  $46/4$  میلی‌متر است. دشت بافق به علت پست بودن علاوه بر کاهش نزولات جوی، وزش بادهای گرم و خشک کویری همراه با حرکت ماسه‌های بادی شرایط نامناسب‌تری نسبت به مناطق کوهستانی موجب گردیده است به نحوی که

نزولات جوی در دشت بافق ناچیز و صرفاً به صورت باران است درحالی که در مناطق کوهستانی بارندگی نسبتاً زیاد و حتی مقدار کمی برف می بارد.

#### ۴-۱ وضعیت پوشش گیاهی و جانوری منطقه

پوشش گیاهی در کنار کفه های نمکی و حیات وحش جلوه خاص و زیبایی را به این منطقه کویری بخشیده است. به دلیل گرمای زیاد و تبخیر شدید و همچنین بارندگی کم در این منطقه، پوشش گیاهی بسیار کم و محدود به گیاهان کویری نظیر تاغ، گز و غیره است. در منطقه ی مورد مطالعه دهکده ها، مزارع کوچک صیفی جات و باغ های خرما و انار دیده می شود. حیات وحش آن نظیر آهو، قوچ، شتر، یوزپلنگ و میش (منطقه شکار ممنوع آریز-دره انجیر) انواع خزندگان و عقاب را تشکیل می دهند (شکل ۲-۱ الف، ب).



شکل ۲-۱: الف) نمایی از پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه ب) تصویری از شتر در دشت زیرگان

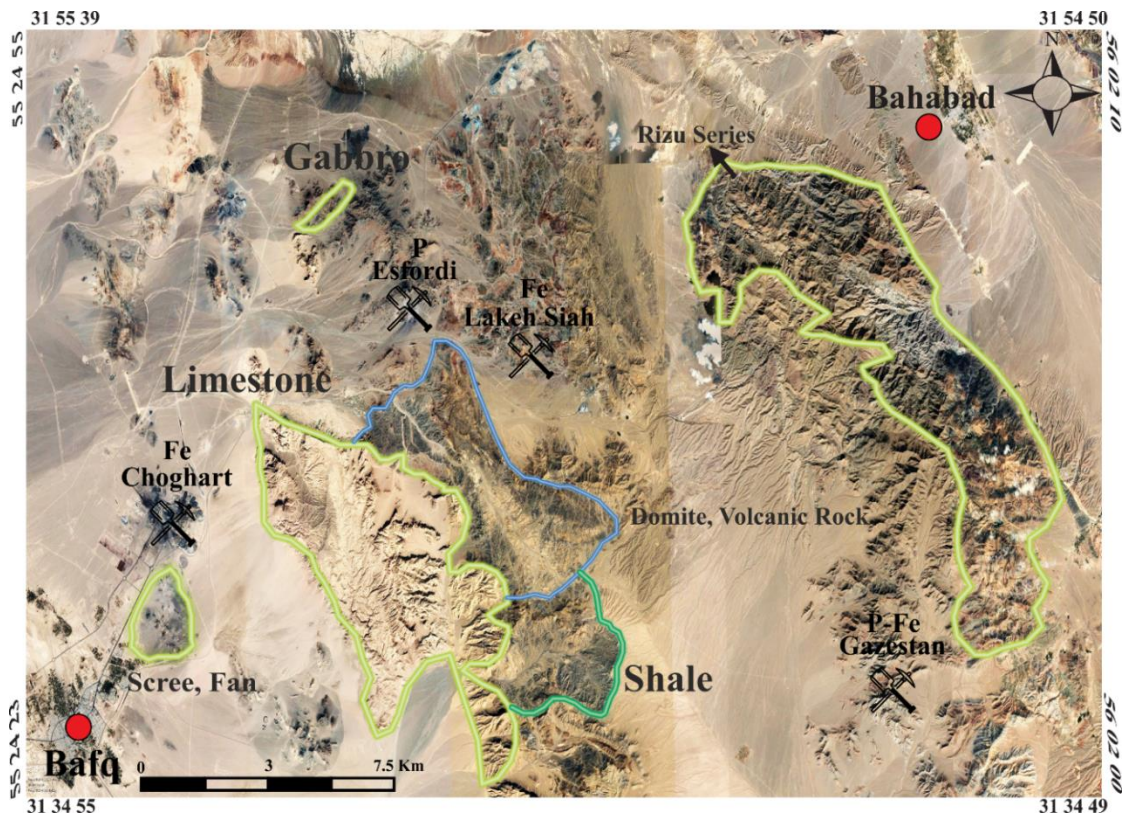
#### ۵-۱ وضعیت اجتماعی و اقتصادی منطقه

به طور کلی به دلیل وجود معادن غنی همچون معادن آهن چغارت، چادرملو، چغارت، فعالیت معدنی از عوامل جذب جمعیت در منطقه است و شغل بسیاری از مردم منطقه معدنکاری است. همچنین عده ای به کار کشاورزی و دام پروری اشتغال دارند. علاوه بر این به علت وجود درختان خرما، صنایع دستی وابسته به نخل در منطقه رونق فراوان دارد



## ۱-۶ وضعیت زمین‌ریخت‌شناسی منطقه مورد مطالعه

توپوگرافی هر منطقه به عواملی همچون ویژگی‌های ساختاری، لیتولوژی و ویژگی‌های آب و هوایی آن منطقه بستگی دارد. سرعت فرسایش و دگرسانی با وجود درزه‌ها و گسل‌های موجود در منطقه، افزایش می‌یابد. ارتفاعات کوه لک شیر، کوه قلعه و کوه زریگان بلندی‌های محدوده‌ی مطالعاتی را تشکیل می‌دهند که دارای روند شمال غرب- جنوب شرق و مشرف به دشت‌های پست و هموار هستند. دشت‌های وسیع با شیب ملایم به آبراهه‌های بزرگی محدود می‌شوند. سطح دشت‌ها پوشیده از بادرفت‌ها با آثار ریپل مارک و پهنه‌های رسی-نمکی (که نماینده حوضه‌های آبگیر کوچک داخلی می‌باشند) است و اغلب حالتی افقی دارند. طرح آبراهه‌ها از نوع موازی است و ژرفایی از ۰/۵ تا ۲ متر ایجاد می‌نمایند. از دیگر پدیده‌های جالب‌توجه ایران مرکزی وجود تلماسه‌های بادی (موسوم به ریگ) و پلایاها (دق یا پهنه کویری) می‌باشند از طرفی با توجه به فصلی بودن حوضه‌های آبریز هم‌زمان با خشک شدن آن‌ها سطح حوزه متورم شده و ظاهری ترک‌خورده و خشن ایجاد می‌کند. سطوح فرسایشی سنگ‌ها بستگی تنگاتنگ با لیتولوژی و تکتونیک دارد به طوری که در کنار لیتولوژی‌های صخره ساز آهکی کرتاسه و آهکی و دولومیتی سری‌های ریزو، تپه‌های پست و کم ارتفاع گرانیت زریگان و تپه‌ماهورهای نئوژن به چشم می‌خورند (شکل ۱-۳).



شکل ۱-۳: نمایی از زمین‌ریخت‌شناسی منطقه مورد مطالعه

## ۱-۷ تاریخچه معدنکاری در منطقه

منطقه‌ی معدنی بافق دارای منابع زیرزمینی متنوعی است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به سنگ‌آهن چغارت، سنگ‌آهن چاه‌گز، سنگ‌آهن سه‌چاهون، منگنز نارینگان، فسفات اسفوردی، سرب و روی کوشک اشاره کرد. منطقه فلززایی بافق با ذخیره بیش از یک‌سوم سنگ‌آهن کشور به‌عنوان مهم‌ترین منطقه آهن‌دار ایران شناخته شده است. در نتیجه عملیات اکتشافی انجام‌شده از سال ۱۳۴۰ تاکنون در این منطقه بیش از ۳۸ آنومالی آهن با ذخیره نزدیک به ۱/۷ میلیارد تن شناسایی شده که مهم‌ترین آن‌ها معادن آهن چغارت، سه‌چاهون، چادرملو و همچنین معادن فسفات اسفوردی و سرب و روی کوشک نیز از شاخصه‌های معدنی این منطقه هستند. در زیر اشاره‌ی کوتاه و مختصری به تاریخچه‌ی این معادن می‌شود.

### ۱-۷-۱ معدن چغارت

سنگ آهن چغارت در فاصله‌ی ۱۲ کیلومتری از شمال شرق بافق و ۱۲۵ کیلومتری جنوب شرق شهر یزد واقع شده است. چغارت در ابتدا یک تپه‌ی سیاه رنگ و برجسته از آهن به اندازه‌ی ۳۰۰\*۸۰۰ متر و ۱۵۰ متر بالاتر از دشت‌های اطراف و ۱۱۵۰ متر بالاتر از سطح دریا بود. اکتشاف‌های سامان‌مند از سال ۱۹۶۱ آغاز شد و اولین محموله آهن استخراج‌شده به کارخانه‌ی فولاد اصفهان در سال ۱۹۷۱ حمل شد (Torab, 2008).

### ۱-۷-۲ معدن سه‌چاهون

معدن سنگ آهن سه‌چاهون که در فاصله ۴۷ کیلومتری شمال شرقی شهر بافق و ۳۵ کیلومتری شمال معدن چغارت واقع شده است. معدن سه‌چاهون مشتمل بر دو آنومالی X و IX است که در فاصله سه کیلومتری از یکدیگر قرار دارد. بهره‌برداری از این معدن در سال ۱۳۸۴ آغاز شده است و طی برنامه‌ریزی انجام‌شده سالیانه ۳/۲ میلیون تن سنگ‌آهن از این معدن استخراج می‌شود. عملیات حفاری و برداشت در این معدن تا عمق ۱۲۰ متری انجام شده است.

### ۱-۷-۳ معدن چادرملو

معدن چادرملو بزرگ‌ترین معدن سنگ‌آهن شناخته‌شده در ایران با ذخیره‌ی بیش از ۴۰۰ میلیون تن و با درصد ۵۵٪  $Fe_2O_3$ ، ۲/۱۵٪  $P_2O_5$  است و تاکنون حدود ۴۰ میلیون تن از آن استخراج شده است. این کانسار در حدود ۸۰ کیلومتری از شمال شهر بافق واقع شده است. این کانسار شامل دو بخش شمالی و جنوبی و برخی از ناهنجاری‌های مگنتیت جداگانه است. اکتشاف‌های دقیق بین سال‌های ۱۹۷۵ تا ۱۹۷۸ انجام شد و سرانجام به احداث کارخانه در تابستان سال ۱۹۹۷ منجر شد. در حال حاضر این معدن روباز در عمق ۱۰۰ متری زیر سطح و قابلیت استخراج ۱۲ میلیون تن در سال را دارد. با این حال تولید واقعی حدود ۷/۸ میلیون تن در سال است (Torab, 2008).

## ۱-۷-۴ معدن فسفات اسفوردی

کانسار آپاتیت- مگنتیت اسفوردی در فاصله‌ی ۳۵ کیلومتری شمال شهر بافق قرار گرفته است. کانسار اسفوردی ابتدای دهه‌ی هفتاد میلادی برای پتانسیل سنگ‌آهن مورد بررسی قرار گرفته اما به دلیل درصد بالایی از کانی‌زایی آپاتیت برای تعیین پتانسیل فسفات آن توسط سازمان زمین‌شناسی ایران از سال ۱۹۸۱ میلادی مورد مطالعه قرار گرفته است. بعد از پی‌جویی‌های دقیق طی ۱۰ سال (۱۹۹۲-۱۹۸۲) ساخت کارخانه در سال ۱۹۹۳ آغاز شد و فعالیت معدن در سال ۱۹۹۹ با تولید کنسانتره فسفات برای استفاده در صنایع کود و اسید فسفریک ادامه یافت (Jami, 2006).

## ۱-۸ مطالعات پیشین

در ارتباط با منطقه فلززایی بافق و موضوع تحقیق در ایران، مطالعات زمین‌شناسی و معدنی گسترده‌ای انجام شده است. در این بخش ابتدا به مطالعات انجام شده در منطقه فلززایی بافق، پس از آن تحقیقات انجام شده در ارتباط با موضوع تحقیق در سایر نقاط ایران می‌پردازیم.

### ۱-۸-۱ کارهای انجام‌شده قبلی در ارتباط با منطقه فلززایی بافق

مطالعات انجام شده در منطقه فلززایی بافق به شرح زیر است:

- اسلامی‌زاده (Eslamizadeh, 2016)، به مطالعه و بررسی پترولوژی و ژئوشیمی سنگ‌های میزبان کانه‌زایی تیپ کایرونا در آنومالی شماره ۱۰ کانسار سه‌چاهون پرداخت. براساس نتایج به دست آمده وی اظهار داشت که کانی‌سازی مگنتیت، هماتیت و آپاتیت از طریق تفریق ماگمایی رخ داده است و تشکیل کانی‌هایی نظیر اکتینولیت نتیجه فرایند گرمایی است.

- ایران‌منش و همکاران (۱۳۹۸)، به بررسی رشد بلورهای موناژیت و تامین عناصر خاکی نادر از کانی

آپاتیت در کانسار اسفوردی پرداخته‌اند

- برومندی (Borumandi, 1973)، در رساله‌ی دکتری خود علاوه بر مطالعه‌ی وضعیت کانی‌شناسی و کانی‌سازی منطقه، برای نخستین بار از اصطلاح سازند اسفوردی برای توصیف ردیفی از رسوبات تخریبی، شیل، آهک، دولومیت، توف و ریولیت استفاده نمود.
- بنیادی و همکاران (Bonyadi et al., 2011)، اهمیت میانبارهای سیال آپاتیت و موناژیت را در کانسار اکسید آهن و آپاتیت سه‌چاهون با رویکرد ژئوشیمی و پاراژنتیک مورد بررسی قرار دادند.
- پشت‌کوهی و همکاران (Poshtkoochi et al., 2018)، با مطالعه و بررسی ژئوشیمیایی و پتروژنز منطقه بیابانک، اظهار داشتند که ماگماتیسم مافیک در این منطقه تا حد زیادی بیانگر موقعیت کمان ماگمایی و یا کافت‌زایی است.
- تراب (Torab, 2008)، با بررسی کانی‌شناسی و ویژگی زمین‌شناسی کانسارهای ناحیه بافق منشأ فسفریت‌های آن را رسوبی عنوان نموده است.
- تقی‌پور و همکاران (Taghipour et al., 2015)، اجتماع کانی‌های اسکارن در کانسار اکسید آهن و آپاتیت اسفوردی را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند.
- جمی (Jami, 2006)، با بررسی کانسار اسفوردی منشأ سیالات کانه‌ساز را شوراب‌های تبخیری و در مرحله دوم سیالات منشأ گرفته از توده گرانیتی می‌داند.
- چن زوئی (Chen, 1994) مطالعاتی گسترده‌ای بر روی پتانسیل کانی‌سازی آپاتیت در ایران مرکزی و به‌خصوص در نواحی آهن‌دار بافق انجام داده است و بر اساس الگوی یکسان REE در تمام این معادن خاستگاه کانی‌سازی آهن را در تمام آن‌ها یکسان دانسته است.
- حمدی (۱۳۷۴)، در کتاب سنگ‌های رسوبی پرکامبرین و پالئوزوئیک ایران به مطالعه و اندازه‌گیری ستون چینه‌شناسی منطقه کوشک پرداخته و سری کوشک را معرفی نمود
- حیدری (۱۳۵۷)، در رساله‌ی کارشناسی ارشد خود به مطالعه‌ی ولکانیسم مناطق اسفوردی-زریگان پرداخت و علاوه بر تفکیک سنگ‌های آتشفشانی ناحیه به نتایج جالبی درزمینه‌ی پترولوژی و ژئوشیمی سنگ‌های مزبور دست‌یافت.

- حیدریان و همکاران (Heidarian et al., 2018)، مراحل تشکیل کانسنگ را در کانسار چادرملو با استفاده از روش‌های EPMA، LA-ICP-MS و ژئوکرونولوژی مورد مطالعه و بررسی قرار دادند
- حقی پور (Haghipour, 1974)، در پژوهشی قابل توجه، بخش وسیعی را از بیابانک تا بافق مورد تشخیص و تفحص قرارداد که حاصل آن یک نقشه‌ی فراگیر با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰۰ از بیابانک تا بافق و نقشه‌ی دیگری با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ از ناحیه‌ی پشت بادام است. وی همچنین در سال (۱۹۸۰) سنگ‌های پرکامبرین را در ناحیه‌ی ایران مرکزی مورد بررسی قرارداد.
- درویش زاده (۱۳۶۲)، چگونگی پیدایش کانسار آهن-آپاتیت اسفوردی را مورد مطالعه قرارداد و علاوه بر تشریح وضعیت زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی منطقه، کانی‌سازی آپاتیت را با توفها و ریولیت‌های این محل بی‌ارتباط دانسته و این سنگ‌ها و سایر رسوبات همراه آن‌ها را با سری هرمز مقایسه نموده است. وی همچنین اعتقاد دارد که سنگ‌های آذرین اسیدی و بازیک منطقه به لحاظ ژئیتیکی از یکدیگر مجزا می‌باشند.
- دلیران (Daliran, 1990)، در رساله‌ی دکتری خود سنگ میزبان و کانسار آهن-آپاتیت میشدوان را مورد بررسی قرارداد و آن را در گروه کانسارهای نوع کایرونا تقسیم‌بندی کرد.
- دهقانزاد و همکاران (۱۳۹۷)، با بررسی زمین‌شیمی و کانه‌زایی آهن و آپاتیت کانسار گزستان آن را مشابه کانسار کایرونای سوئد دانستند.
- رستمی و همکاران (۱۳۹۷)، به مطالعه ژئوشیمی، کانه‌زایی و دگرسانی در کانسار آهن و آپاتیت لکه‌سیاه پرداختند. و مراحل تکوین زمین‌شناسی و کانی‌سازی در کانسار آهن-آپاتیت لکه‌سیاه را در سه مرحله پیش از رخداد کالدر، هم‌زمان با رخداد کالدر و پس از فعالیت‌های کالدر تقسیم‌بندی کردند.
- رحیمی و همکاران (Rahimi et al., 2016)، بر روی عناصر خاکی کمیاب کانسار لکه‌سیاه پژوهش ژئوشیمیایی و آنالیزهای آماری انجام دادند. به دو نسل آپاتیت که در گرانیتهای ریز دانه و درشت

دانه اشاره می‌کند و به چگونگی توزیع عناصر کمیاب و نادر در آن‌ها اشاره کرده است و آن‌ها را نتیجه فعالیت‌های هیدروترمالی دانسته است.

- زمین‌شناسان روسی (NISCO, 1971)، در مورد چادرملو، پدیده‌ی متاسوماتیسم برخاسته از یک ماگمای اسیدی را عامل زایش آهن دانسته‌اند.

- رضانی و قادری (۱۳۸۱) کانی‌زایی آهن در ناحیه بافق را در ارتباط با گرانیته‌زایی کامبرین آغازین می‌دانند؛ زیرا کانسنگ آهن- آپاتیت در معدن چغارت با لوکوگرانیته زیرگان از نظر سنی دارای همپوشانی منطقی هستند.

- سازمان زمین‌شناسی (۱۳۸۶)، گزارش و نقشه زمین‌شناسی برگه ۱:۲۵۰۰۰ علی‌آباد را تهیه و گزارش کرده است که قدیمی‌ترین مجموعه سنگی در این منطقه مجموعه خارنگان است که عمدتاً از گری وک، شیل، ماسه‌سنگ، دولومیت‌های بد بو و آهک‌های جلبکی و چرت‌های سیاه تشکیل شده است. از آهک‌های حاوی جلبک این مجموعه فسیل‌هایی به سن کامبرین زیرین به دست آمده است. در این برگه سنگ‌های نفوذی با ترکیب آلکالی گرانیته، سینیت، دیوریت، کوارتز پورفیری، دیاباز، کربناتیت و کانسنگ‌های آهن- آپاتیت گزارش شده است که به شکل‌های توده‌ای و دایک بوده و دارای سن کامبرین پایینی هستند.

- سازمان زمین‌شناسی کشور (۱۳۹۵)، در جهت شناسایی محدوده‌های امیدبخش کانی‌سازی عناصر خاکی کمیاب با پردازش از لایه‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی، دورسنجی و ژئوفیزیکی در استان یزد مطالعات دفتری و صحرایی انجام گرفت و طی گزارشی منتشر شد.

- سامانی (Samani, 1988)، مطالعاتی درباره‌ی شناخت مناطق اورانیم خیز پرکامبرین ایران انجام داده و مسئله ماگماتیسیم کربناتیتی را در ایران مرکزی و زاگرس مطرح نموده است.

- سامانی (Samani, 1998) ذخایر آهن آنومالی XX، آنومالی XIV و چغارت را به عنوان ذخایر مگنتیت- کربناتیت رده‌بندی کرد. ایشان با توجه به مذاب مگنتیتی به این نتیجه رسید که اعتقاد به

این مسئله که ماگمای گرانیتی بتواند منبع توده‌های معدنی با چندین میلیون تن آهن باشد بسیار مشکل است.

- سهیلی و مهدوی (۱۳۷۰)، نقشه زمین‌شناسی چهارگوش ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی را تهیه کردند و گزارش کردند که اصلی‌ترین مجموعه سنگ‌های آذرین و دگرگونی در بلوک پشت بادام- بافق به سامانه‌های پرکامبرین و اینفراکامبرین مربوط می‌شود. سنگ‌های آذرین منطقه از دید ترکیب سنگ‌شناسی دامنه گسترده‌ای از سنگ‌های بازیک تا اسیدی و کاملاً اسیدی را دربرمی‌گیرند؛ در این منطقه چند توده نفوذی به شرح زیر تشخیص داده شده است: توده گرانیت، گرانیت پورفیری لوکوکرات، توده دیوریتی- گابرودیوریتی، توده سینیت- دیوریت- گرانودیوریت، توده بیوتیت گرانیتی، گرانیت پورفیری لوکوکرات شامل توده‌های نفوذی بزرگ زیرگان، ناریگان، چادرملو، ساغند و دیگر توده‌های کوچک‌تر (احتمالاً میکروگرانودیوریت گزستان) و هم‌ارز گرانیت دوران است. این توده‌ها در میان سنگ‌های رسوبی و آتشفشانی سری ریزو نفوذ کرده‌اند و بسیار اسیدی و سدیک و دارای ماهیت آلكالن تا ساب آلكالن هستند.

- شکاریان و همکاران (Shekarian et al., 2017)، به مطالعه و بررسی زمین‌شیمی و کانی‌شناسی اکسید آهن و عناصر خاکی کمیاب در کنسار آهن چغارت پرداخته‌اند و افزایش غلظت عناصر خاکی کمیاب را وابسته به جدایش آپاتیت دانسته و آن را شبیه به نوع کانی‌زایی کایرونا قلمداد کرده‌اند - فرخندی سرخابی (۱۳۷۷)، بر روی پراکندگی عناصر خاکی کمیاب کنسارهای آهن- آپاتیت بافق، به خصوص اسفوردی و چادرملو، مطالعات مبسوطی انجام داده است و دو نوع آپاتیت رگه‌ای و افشان در آهن تشخیص داده است.

- قاضی و همکاران (Ghazi et al., 2019)، با استفاده از ایزوتوپ‌های اکسیژن که بر روی کانسنگ مگنتیتی مطالعه شده است به بررسی منشا هیدروترمالی و آذرین کنسارهای آهن و آپاتیت بافق پرداختند و بخش اصلی کانی‌زایی بافق را ماگمایی دانسته‌اند و اعتقاد دارند که در این منطقه کانی-زایی بیش‌تر از این نیز وجود دارند.



- قائمی و سعیدی ( ۱۳۸۵)، نقشه زمین‌شناسی چهارگوش ۱:۱۰۰۰۰۰ چادرملو را تهیه کردند. قدیمی‌ترین واحد سنگ‌شناسی منسوب به اینفراکامبرین است. سنگ‌های آذرین منطقه از دید ترکیب سنگ‌شناسی دامنه گسترده‌ای از سنگ‌های بازیک تا اسیدی و کاملاً اسیدی را دربرمی‌گیرند؛ در این منطقه چند توده نفوذی با ترکیب گرانیت، گرانیت پورفیری لوکوکرات، توده دیوریتی- گابرویدیوریتی، توده سینیت- دیوریت- گرانودیوریت، توده گرانیت بیوتیتی تشخیص داد شده است که به درون سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی پرکامبرین پسین (سری ریزو) تزریق شده‌اند.

- مختاری (Mokhtari, 2015)، در مقاله‌ای تحت عنوان متالوژنی بلوک پشت بادام یک بخش مناسب برای کانی‌سازی عناصر نادر که در مجله‌ی زمین‌شناسی اروپای مرکزی منتشر شد اظهار داشت که کانسارهای آهن-آپاتیت ایران مرکزی از بلوک پشته بادام از عناصر نادر خاکی غنی هستند. همچنین در میان کانسارهایی که در این منطقه وجود دارد، اسفوردی، زیرگان، گزستان و لکه‌سیاه بیشترین اهمیت برای کانی‌سازی عناصر نادر خاکی و برای برنامه‌های اکتشافی توصیه می‌شوند.

- ندیمی (Nadimi, 2007)، اعتقاد دارد در ناحیه‌ی ساغند کمپلکس‌های پی‌سنگی قدیمی مانند کمپلکس پشت بادام و کمپلکس دگرگونی حلقوی چایدونی در زمان پالئوپروتروزوئیک در طول کوهزایی چایدونین تشکیل و در زمان پالئوپروتروزوئیک تا نئوپروتروزوئیک در اثر رژیم تکتونیک فشارشی دگرگون شده است.

#### ۱-۸-۲ کارهای انجام‌شده قبلی مرتبط با این موضوع تحقیق در دیگر نقاط ایران

- سازمان زمین‌شناسی کشور ( ۱۳۹۵)، به اکتشافات مقدماتی در پهنه البرز مرکزی جهت شناسایی پتانسیل‌های کانی‌سازی عناصر نادر خاکی پرداخت.

- فخری ( ۱۳۹۷)، کانه‌زایی‌های آهن و آپاتیت سری هرمز در جنوب کشور را مطالعه نموده و بخشی از کانه‌زایی آهن منطقه هرمز را از نوع سازندهای آهن نواری نوع آگوما و کانه‌زایی‌های آهن-آپاتیت را از نوع ماگمایی- گرمابی معرفی نمودند.

- مختاری و همکاران (Mokhtari et al., 2018)، مقاله‌ای را تحت عنوان ژئوشیمی و ذخایر بالقوه عناصر نادر در کانسارهای آهن-آپاتیت در منطقه‌ی طارم منتشر کردند. آن‌ها اظهار داشتند که کانسارهای آهن-آپاتیت طارم الگوی مشابه عناصر نادر دارند. این امر منشأ و فرایندهای پیدایش یکسان را نشان می‌دهد. الگوهای عناصر نادر در کانه‌های آهن-آپاتیت، سنگ میزبان کوارتز مونزونیت مشابه را نشان می‌دهد. الگوهای مشابه نشان می‌دهد که این توده نفوذی یک منبع مشترک با ذخایر آهن-آپاتیت را به اشتراک می‌گذارد.

- نباتیان و همکاران (Nabatian et al., 2014)، پژوهشی را تحت عنوان زمین‌شناسی، دگرسانی، سن و منشأ کانسارهای آهن-آپاتیت در ائوسن بالایی کوارتز مونزونیت در ناحیه‌ی زنگان انجام دادند. نام-بردگان به این نتیجه رسیدند که کانسارهای آهن-آپاتیت واقع شده در زنگان نمونه‌ی خوبی از یک میزبان کوارتز مونزونیت کانسار تیپ کایرونا است. همچنین بیان کردند که کانسارهای آهن-آپاتیت زنگان تفسیرکننده‌ی خوبی برای پی بردن به منشأ سیال ماگمایی و با تیپ آهن-فسفات کایرونا قابل مقایسه هستند.

## ۱-۹ رده‌بندی انواع کانسارهای عناصر خاکی کمیاب

تقسیمات مختلفی برای کانسارهای این عناصر ارائه شده است که بر اساس کانی‌شناسی REE و سنگ میزبان بوده است این درحالی که است که بر اساس آخرین تقسیم‌بندی عناصر خاکی کمیاب که (Weng et al., 2013) ارائه کردند این عناصر را بر اساس فرایندهای زمین‌شناختی که این مواد معدنی را متمرکز می‌کنند و تشکیل معدنی REE را قادر می‌سازند تقسیم‌بندی کردند (جدول ۱-۱).

جدول ۱-۱: رده‌بندی انواع کانسارهای عناصر خاکی کمیاب (Weng et al., 2013)

مثال	نوع کانه زایی	فرایند
Bayan Obo, China	کربناتیت	آذرین
Khibina and Lovozera, Russia	کمپلکس های آلکان	سنگ های آذرین تحت اشباح از سیلیس
Bokan, USA	پگماتیت های آلکان	
Round Top, USA	ولکانیک های فلسیک	سنگ های آذرین اشباح و فوق اشباح از سیلیس
Khibna massif, Russia	گرانیت و	
Ytterby, Sweden	پگماتیت گرانیت	
Olympic Dam, Australia	تماس با گرانیت	هیدروترمال
Mary Kathleen, Australia	تماس با کربناتیت	(IOCG) اکسید آهن مس- طلا اسکارن
Saima, China		رسوبی/ ثانویه
WIM 150, Australia		(HMS) کانی های سنگین ماسه ای
Tantalus, Madagascar		لاتریت/ خاک/ رس
Steenkampskraal, South Africa		باطله
Buckton, Canada		شیل میزبان

## ۱-۱۰ طرح مسئله و هدف از مطالعه

با توجه به کاربرد عناصر خاکی کمیاب در فناوری‌های پیشرفته، اهمیت فلززایی این عناصر در متاسوماتیت‌ها و پتانسیل‌های معدنی ناحیه اسفوردی، این منطقه برای موضوع تحقیق حاضر انتخاب شده است. ذکر این نکته هم حائز اهمیت است که مطالعات قبلی عناصر خاکی کمیاب (REE) در این ناحیه عمدتاً بر روی کانسارهای آهن و آپاتیت بوده است، درحالی‌که تمرکز تحقیق حاضر بر مطالعه فلزات کمیاب در متاسوماتیت‌ها و اثبات قطعی وجود سنگ‌های متاسوماتیتی در این ناحیه است.

## ۱-۱۱ روش مطالعه

انجام این پژوهش طی چند مرحله شامل مطالعات دفتری، بررسی‌های صحرایی، نمونه‌برداری، تجزیه شیمیایی و مطالعه نمونه‌ها، پردازش و تفسیر داده‌ها و نتایج است. در این بخش به‌اختصار هر مورد معرفی و شرح کامل آن‌ها در بخش مربوط به خود ارائه می‌شود.

### ۱-۱۱-۱ مطالعات صحرایی

پس از مطالعات اولیه و آشنایی کلی با منطقه مورد مطالعه بازدید صحرایی طی یک هفته انجام گرفت. در این مرحله برداشت‌های زمین‌شناسی به منظور تهیه نقشه‌ی زمین‌شناسی بزرگ مقیاس از

محدوده‌ی کانی سازی و سنگ‌های میزبان به عمل آمد. همچنین در هر کانسار نمونه‌برداری برای اهداف زیر انجام گرفت.

به منظور مطالعات کانی‌شناسی و سنگ‌نگاری تعداد ۳۲ نمونه جهت تهیه‌ی مقطع نازک و ۱۷ نمونه جهت تهیه‌ی مقطع نازک صیقلی از مناطق مورد مطالعه برداشت شد.

نمونه‌برداری به جهت مطالعات پترولوژیکی و ژئوشیمیایی، در این راستا تعداد ۲۵ نمونه از کانسنگ و سنگ‌های میزبان برای تجزیه‌ی ژئوشیمیایی از معادن اسفوردی، گزستان، لکه‌سیاه، و چغارت نمونه‌برداری صورت گرفت. لازم به ذکر است این نمونه‌ها باید غیر هوازده، دگرسان نشده و فاقد رگه و رگچه انتخاب می‌شدند.

همچنین به منظور آنالیز کانی‌شناسی به روش XRD تعداد دو نمونه از منطقه‌های لکه‌سیاه و اسفوردی برداشت شد. به طور کلی در این مرحله، از منطقه‌های اسفوردی، گزستان، لکه‌سیاه و چغارت تعداد ۴۹ نمونه جهت تهیه‌ی مقاطع نازک و نازک صیقلی، تعداد ۲۵ نمونه جهت آنالیزهای ژئوشیمیایی و پترولوژیکی و ۲ نمونه جهت آنالیز کانی‌شناسی به روش XRD نمونه‌برداری صورت گرفت.

#### ۱-۱۱-۲ مطالعات آزمایشگاهی و دفتری

قدم اول در انجام این پروژه جمع‌آوری و مطالعه منابع و اطلاعات موجود است. در این مرحله گزارش‌های تهیه شده توسط سازمان زمین‌شناسی، نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی منطقه معدنی و کارهای انجام شده قبلی در منطقه بافق- اسفوردی مورد مطالعه قرار گرفت. در این مرحله پس از انجام نمونه‌برداری، به ترتیب ۳۲ مقطع نازک و ۱۷ مقطع نازک صیقلی جهت مطالعه‌ی کانی‌شناسی و کانه‌نگاری در آزمایشگاه نوری دانشکده علوم دانشگاه صنعتی شاهرود انجام گرفت. برای مطالعات ژئوشیمیایی تعداد ۱۴ نمونه سنگ و ۱۱ نمونه کانسنگ به آزمایشگاه اکی (acme lab) کانادا فرستاده شد. این نمونه‌ها ابتدا در حضور لیتیوم تترابرات ذوب شده و در مرحله‌ی بعد برای عناصر اصلی (L.O.I. و  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}_t$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) به روش

ICP-OES و برای عناصر کمیاب و خاکی کمیاب ( Ag, Ba, Co, Cr, Cs, Cu, Ga, Hf, Mo, Nb, Ni, Pb, Rb, Sn, Sr, Ta, Th, Tl, U, V, W, Zn, Zr, Sc, Ge, Te, In, Cd, Re, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y ) به روش ICP-MS تجزیه شدند. حدود قابل ثبت پایین و بالای روش‌های آنالیز ذکر شده برای تمامی عناصر در (جدول ۱-۲) آورده شده است. نتایج حاصل از مراحل قبل با مطالعه کتب مرجع و مقالات و از جمله Arc GIS، Excel، Google Earth، Global Mapper، Grapher، IBM SPSS Statistics 24، GCDKIT 4.1، دست‌بندی، پردازش و تلفیق گردیده و در نگارش پایان‌نامه از آن استفاده شده است.

جدول ۱-۲: مقدار حد قابل ثبت بالا و پایین برای عناصر اصلی برحسب درصد، کمیاب و خاکی کمیاب برحسب PPM

عنصر	حد قابل ثبت پایین	حد قابل ثبت بالا
<b>SiO<sub>2</sub></b>	0.01	100
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.01	100
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.002	100
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.04	100
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0.01	100
<b>MgO</b>	0.01	100
<b>MnO</b>	0.01	100
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.01	100
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.01	100
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.01	100
<b>Ba</b>	1	50,000
<b>Be</b>	1	10,000
<b>Ce</b>	0.1	50,000
<b>Co</b>	0.2	10,000
<b>Cs</b>	0.1	1,000
<b>Dy</b>	0.05	10,000
<b>Er</b>	0.03	10,000
<b>Eu</b>	0.02	10,000
<b>Ga</b>	0.5	10,000
<b>Gd</b>	0.05	10,000
<b>Hf</b>	0.1	10,000

<i>Ho</i>	0.02	10,000
<i>La</i>	0.1	50,000
<i>Lu</i>	0.01	10,000
<i>Nb</i>	0.1	1,000
<i>Nd</i>	0.3	10,000
<i>Pr</i>	0.02	10,000
<i>Rb</i>	0.1	1,000
<i>Sm</i>	0.05	10,000
<i>Sn</i>	1	10,000
<i>Sr</i>	0.5	50,000
<i>Ta</i>	0.1	1,000
<i>Tb</i>	0.01	10,000
<i>Th</i>	0.2	10,000
<i>W</i>	0.5	10,000
<i>Y</i>	0.1	50,000
<i>Yb</i>	0.05	10,000
<i>Zr</i>	0.1	50,000
<i>Ni</i>	20	10,000
<i>Sc</i>	1	10,000

## ۱-۱۲ طرح کلی محتوای رساله

در فصل اول به کلیاتی در ارتباط با موقعیت جغرافیایی، آب‌وهوا و شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعه و مرور اجمالی بر تاریخچه معدن کاری در منطقه می‌پردازیم. همچنین در ارتباط با اهداف و روش مطالعه توضیحاتی ارائه شده است. در فصل دوم ابتدا در بخش زمین‌شناسی ناحیه‌ای به بررسی اجمالی پهنه‌ی ایران مرکزی و بلوک پشت بادام می‌پردازیم و در قسمت زمین‌شناسی منطقه‌ای به تفسیر مناطق مورد مطالعه شامل: اسفوردی، گزستان، لکه‌سیاه و چغارت می‌پردازیم. در فصل سوم، ویژگی‌های سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی نمونه‌های سنگی منطقه مورد مطالعه اهم از آتشفشانی، نفوذی و رسوبی بر اساس مطالعات میکروسکوپی ارائه می‌شود. در فصل چهارم به تشریح کانه‌نگاری، ساخت، بافت و توالی پاراژنزی نمونه‌های کانسنگ منطقه می‌پردازیم. فصل پنجم و ششم به بررسی-

های ژئوشیمیایی سنگ میزبان و کانسنگ‌ها که به کمک روش‌های ICP-MS تجزیه شده‌اند مورد بررسی قرار می‌گیرد. نمودارهای رسم شده برای کانی‌های مگنتیت و آپاتیت با استفاده از عناصر اصلی، فرعی و جزئی، تشخیص محیط تشکیل، ژنز و تیپ کانسار را امکان‌پذیر می‌کند. در فصل هفتم به بررسی مطالعات میانبارهای سیال به منظور تشخیص ماهیت سیال کانه‌ساز و فرایندهای کانه‌سازی می‌پردازیم؛ و در نهایت در فصل هشتم به بحث و نتیجه‌گیری و ارائه الگوی مدل متالورژیک از منطقه بافق می‌پردازیم.



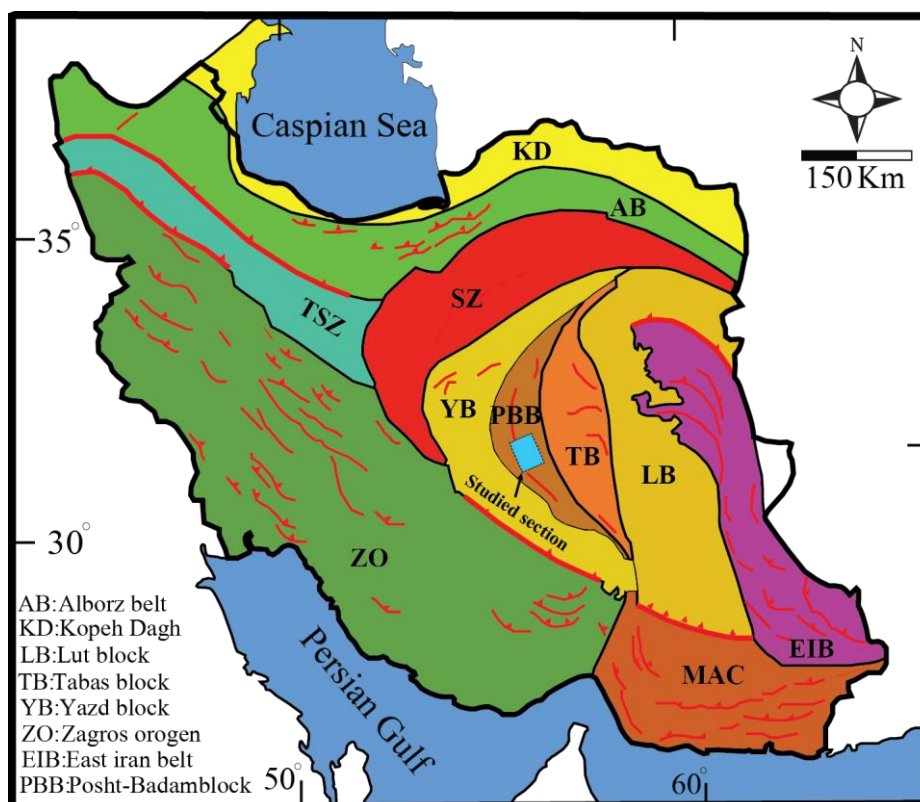


فصل دوم

زمین شناسی

## ۱-۲ مقدمه

منطقه مورد مطالعه در تقسیم‌بندی پهنه‌های زمین‌ساختی ایران، در پهنه‌ی ایران مرکزی جای می‌گیرد. پهنه‌ی ایران مرکزی به نوبه‌ی خود به زیر پهنه‌های سبزواری، یزد، پشت بادام، طبس و لوت تقسیم شده است (Alavi, 1991). منطقه‌ی فلززایی بافق در بخش مرکزی بلوک پشت بادام واقع شده است (شکل ۱-۲). منطقه‌ی مورد مطالعه در تقسیم‌بندی چهارگوشه‌های ۱:۲۵۰۰۰۰ زمین‌شناسی ایران در ورقه‌های ۱:۲۵۰۰۰۰ یزد (NH40-1) و راور (NH-40-2) جای می‌گیرد. همچنین این منطقه بخش کوچکی از چهارگوشه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی بافق (شماره ۷۰۵۳) و اسفوردی (شماره ۷۱۵۳) را در بر می‌گیرد. در این فصل ابتدا به شرح مختصری درباره‌ی زمین‌شناسی ناحیه‌ی ایران مرکزی و به طور ویژه بلوک پشت بادام پرداخته می‌شود، و در ادامه ویژگی‌های زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی منطقه‌های معدنی اسفوردی، گزستان، لکه‌سیاه و چغارت توصیف گردیده است.



شکل ۱-۲: موقعیت منطقه مورد مطالعه (مستطیل آبی رنگ) در نقشه ساختاری-رسوبی ایران (Alavi, 1991)

## ۲-۲ زمین‌شناسی ناحیه‌ای

در این بخش ابتدا به ویژگی‌های زمین‌شناسی عمومی پهنه‌ی ایران مرکزی پرداخته می‌شود و در ادامه بلوک پشت بادام به لحاظ ویژگی‌های زمین‌شناسی توصیف شده است.

### ۲-۲-۱- زمین‌شناسی پهنه ایران مرکزی

ایران مرکزی با مساحت دو هزار و سیصد کیلومتر مربع یکی از واحدهای اصلی زمین‌شناسی ایران است که به شکل مثلث در مرکز ایران و در میان پهنه‌های زمین‌ساختی البرز، سنندج - سیرجان و رشته کوه‌های شرق ایران در محدوده‌ی کوهزایی آلپ - هیمالیا قرار گرفته و توسط زمین‌درزهای افیولیتی شرق ایران، نایین- بافت، گسل دورونه و افیولیت‌های کاشمر- سبزوار احاطه شده است (Ramezani and Tucker, 2003). محدوده ایران مرکزی از دیدگاه پژوهشگران آشنا به زمین‌شناسی ایران متفاوت می‌باشد و برخی از زمین‌شناسان از جمله (Stocklin, 1968)، این پهنه را از شمال به کوه‌های البرز، از خاور به بلوک لوت و از جنوب باختری به پهنه سنندج - سیرجان محدود می‌کنند. در حالی که (نبوی، ۱۳۵۵)، بخشی از لوت (شمال لوت)، و افتخارنژاد (۱۳۵۹) همه‌ی لوت را جز ایران مرکزی می‌داند. همچنین (Nogole-Sadat, 1993) محدوده ایران مرکزی را خیلی گسترش می‌دهد و بخش‌هایی را به صورت زیر پهنه جدا می‌کند. ایران مرکزی به عقیده (Boulin, 1991) بین دو نوار کوهزایی تتیس قدیم (در شمال) و تتیس جدید (در جنوب) واقع شده است. حد شمالی این پهنه، بلندی‌های البرز و حد جنوب - جنوب باختری آن سنگ‌های آتشفشانی ارومیه - دختر قرار دارد. حد جنوبی و جنوب باختری آن توسط کمربندی از گسل‌های پرشیب و مستقیم که تا مزوزوئیک فعال بوده‌اند، از ناحیه‌ی سنندج - سیرجان جدا می‌شود (Sengor, 1991). حد خاوری این پهنه چندان مشخص نیست، چرا که برخی از زمین‌شناسان، بلوک لوت را جز ایران مرکزی و برخی دیگر قطعه‌ای جداگانه از آن می‌دانند. این پهنه یکی از پیچیده‌ترین واحدهای زمین‌شناسی به شمار می‌رود. در این پهنه، قدیمی‌ترین سنگ‌های دگرگون شده (پرکامبرین) تا آتشفشان‌های فعال و نیمه فعال امروزی وجود دارد. در واقع این منطقه را می‌توان محل قدیمی‌ترین قاره در ایران محسوب دانست که حوادث

زمین‌شناسی فراوانی را به خود دیده است (درویش زاده، ۱۳۷۰). پی‌سنگ متبلور ایران مرکزی و پوشش پلاتفرمی آن، حداقل از دوران پالئوزویک در امتداد گسل‌های بزرگ شکسته شده و با توجه به نبوده‌های چینه‌شناسی در بعضی از مناطق حرکات قائم مداومی را متحمل شده که در پیدایش آتشفشان‌های دوران سوم بی‌تاثیر نبوده است (هوشمندزاده، ۱۳۶۷). در این پهنه علاوه بر وجود سنگ‌هایی با سن پرکامبرین پسین تا کواترنر، فازهای گوناگون کوهزایی، ماگماتیسم و دگرگونی نیز رخ داده است (قربانی، ۱۳۸۶). به باور (Stocklin, 1968)، پس از سخت شدن پی‌سنگ پرکامبرین، این بخش در زمان پالئوزوئیک ویژگی‌های سکویی داشته و در زمان مزوزوئیک و سنوزوئیک به منطقه‌ای پرتحرک و پویا تبدیل شده است. با این وجود، باید گفت که الگوی ساختاری حاکم بر این پهنه از نوع بلوک‌های جداشده با گسل‌های عمده است که هر یک ویژگی‌های جداگانه دارند و پویایی آن در همه جا یکسان نیست (آقانباتی، ۱۳۸۳). در ارتباط با ماگماتیسم و دگرگونی در ایران مرکزی، علاوه بر دگرگونی و ماگماتیسم پرکامبرین که در ساغند، اردکان، تروود و ارومیه دیده می‌شود طی دوره سیلورین با فعالیت‌های آتشفشانی (تروود)، در تریاس با دگرگونی و گرانیت‌زایی (گرانیت‌های ساغند-اسماعیل آباد) در ژوراسیک با گرانیت‌زایی (گرانیت‌های شیرکوه یزد و جنوب اصفهان) و در کرتاسه و ائوسن نیز با فعالیت‌های آتشفشانی مهمی به ویژه در نوار آتشفشانی سهند-بزمان همراه بوده است. سرانجام فعالیت‌های آتشفشانی نیمه فعال امروزی نظیر آتشفشان بزمان، جنوب یزد و انار را می‌توان آخرین فعالیت این پهنه دانست (آقانباتی، ۱۳۸۵).

ایران مرکزی از دیدگاه فلززایی بسیار متنوع و دارای چند کمربند معدنی و چندین منطقه فلزایی می‌باشد. در این پهنه کانه‌زایی گسترده‌ای از آهن، سرب و روی، منگنز، طلا، مس، بوکسیت، باریت، فسفات، فلوریت، سلسیت و... در چندین برهه زمانی رخ داده است. به‌طور کلی منطقه‌های فلززایی معدنی مهم این پهنه عبارتند از: منطقه فلززایی بافق، انارک، تفت و منطقه معدنی مثلث کوه‌بنان-بهباد-راور. همان‌گونه که در بخش مقدمه به آن اشاره گردید، پهنه‌ی ایران مرکزی بر اساس تقسیم بندی (Alavi, 1991)، شامل چهار بلوک می‌باشد که از شرق به غرب شامل: بلوک لوت، طبس، پشت

بادام و یزد است. چهار بلوک مذکور توسط گسل‌های ناحیه‌ای که به سمت غرب خمیدگی دارند و از نوع امتداد لغز راستگرد هستند، از یکدیگر جدا شده‌اند (آقانباتی، ۱۳۸۳). این بلوک‌ها دارای سنگ پوشش‌های مشابه بوده، ولی تفاوت‌های زیادی در رخساره‌های محلی و ضخامت واحدهای چینه-شناسی آن‌ها وجود دارد. هر بلوک دارای تاریخچه تغییر شکل و الگوی لرزه خیزی منحصر به فرد است و بدین طریق از بلوک‌های مجاور خود قابل تشخیص است (Berberian and King, 1981). با توجه به اینکه منطقه‌ی مورد مطالعه در بلوک پشت‌بادام قرار گرفته در ادامه به توصیف ویژگی‌های زمین‌شناسی این بلوک پرداخته شده است.

## ۲-۲-۲- زمین‌شناسی بلوک پشت بادام و منطقه فلززایی بافق

بلوک پشت‌بادام عبارت است از یک زیر پهنه کانه‌زایی/تکتونیکی به سن نئوپروتوزوئیک پسین-کامبرین پیشین است که در نواری به درازای ۱۵۰ کیلومتر و پهنای ۳۰ کیلومتر با راستای شمال، شمال‌غربی - جنوب، جنوب‌شرقی در حد فاصل شهر بافق در جنوب و روستای پشت بادام در شمال قرار گرفته است (شکل ۲-۲). نکته اساسی این بلوک، رخنمون‌های دگرگونی منسوب به پرکامبرین است که بیشتر از نوع سنگ‌های آتشفشانی، آتشفشانی-رسوبی به همراه مرم‌های آهکی و دولومیتی است. این پی‌سنگ، شبیه پی‌سنگ پروتروزوئیک عربستان است که مجموعه پان‌آفریکن نام دارد. سنگ‌های ماگمایی این بلوک محدود به پرکامبرین نیستند. ردیف‌های پرکامبرین پسین-کامبرین پیشین آن (سری‌های ریزو و دزو)، به ویژه در شمال کرمان، همراهی از گدازه‌های قلیایی و خاستگاه کافتی دارند و به نظر می‌رسد که کافتی شدن از ویژگی‌های این بلوک باشد. در این بلوک، سنگ‌های پالئوزوئیک بالایی-ژوراسیک گسترش محدود داشته و دگرگونه هستند و به نظر می‌رسد که تکرار فرایندهای دگرگونی در زمان‌های پرکامبرین پسین، تریاس پسین و ژوراسیک میانی می‌توانند هم‌چنان از ویژگی‌های آن باشند (آقانباتی علی، ۱۳۸۳). جوان‌ترین سنگ‌های بلوک پشت بادام، کربنات-های صخره‌ساز کرتاسه است که غیر دگرگونه هستند و تصور دگرگون شدن پی‌سنگ ناحیه را در زمان ترشیری پرسش‌آمیز می‌سازند (آقانباتی، ۱۳۸۳). تنوع لیتولوژی و فازهای ماگمایی که در ایران

مرکزی دیده می‌شود، در این ناحیه به خوبی هویدا است. عمده‌ترین سنگ‌های آذرین و دگرگونه موجود در بلوک پشت بادام، به سیستم‌های نئوپروتوزوئیک پسین- کامبرین پیشین مربوط می‌شود. سنگ‌های آذرین این بلوک از نظر ترکیب سنگ‌شناسی، دامنه وسیعی از سنگ‌های مافیک تا فلسیک و کاملاً فلسیک را در بر گرفته و انواع نفوذی، نیمه نفوذی و خروجی را شامل می‌گردد. در این منطقه انواع مختلفی از کوارتز پورفیرها، ریولیت‌ها، سینیت‌ها، گرانیت‌ها، آندزیت بازالت‌ها و نیز کوارتز کراتوفیرها، پلاژیوفیرها و آلبیتوفیرها دیده می‌شوند که کم و بیش تحت تاثیر متاسوماتیسم واقع شده و یا از آن ناشی شده‌اند. علاوه بر این، در قسمت‌های مرکزی بلوک، ماگماتیسم از نوع پیروکسنیت- سینیت- کربناتیته نیز گزارش شده است (درویش زاده و آل طه، ۱۳۷۵؛ درویش زاده، علی، ۱۳۶۲؛ سامانی و همکاران، ۱۳۷۲؛ سامانی، ۱۳۶۴؛ مر و دهقانی، ۱۳۷۸). اصلی‌ترین واحدهای سنگ چینه- ای در این پهنه متالوژنی سازندهای ناتک، ساغند، ریزو و دزو است. به اعتقاد (سامانی و همکاران، ۱۳۷۲)، قدیمی‌ترین واحد رخنمون یافته در ایران مرکزی، انباشته‌های فلیشی- تخریبی با رخساره‌ی شیب قاره‌ای، به نام سازند ناتک است که سن پرتو سنجی ۷۵۰ تا ۸۷۴ میلیون سال دارد. سازند ناتک، با ناپیوستگی زاویه‌دار در زیر سنگ‌هایی با رخساره کافت قاره‌ای قرار دارد که میزبان کانسارهای عمده‌ی مگنتیت، آپاتیت، مواد پرتوزا و عناصر خاکی کمیاب بوده و به نام سازند ساغند نام‌گذاری شده است (سامانی، ۱۳۷۱). سازند ساغند، به ضخامت ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ متر، دارای ماگماتیسم با سرشت دوگانه، سنگ‌های آواری، آذرآواری و شیمیایی- رسوبی بوده و قابل تقسیم به پنج عضو جداگانه است که سن آن‌ها در محدوده‌ی زمانی ۵۸۳ تا ۷۸۰ میلیون سال قبل است. سازند ساغند در زیر لایه‌هایی قرار دارد که رخساره کافتی داشته و هم‌ارز سازندهای ریزو، دزو و سلطانیه است. کمپلکس‌های دگرگونی (چاپدونی، بنه‌شورو و سازند تاشک) همان طبقات سازند ناتک هستند که در زمان مزوزوئیک و سنوزوئیک دگرگون شده و ماگماتیسم گرانیتی در آن نفوذ کرده است (سامانی و همکاران، ۱۳۷۲). در ضمن، ایشان برای مجموعه‌های چاپدونی، بنه‌شورو و تاشک، نام گروه تاشک را پیشنهاد نموده، مشروط بر آن که سازند تاشک به سازند ناتک تغییر نام دهد. بر طبق اطلاعات نقشه

۱۰۰۰۰۰:۱ اسفوردی (سهیلی و مهدوی، ۱۳۷۰)، قدیمی‌ترین سنگ‌های این ناحیه مربوط به پرکامبرین بوده و شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های دگرگونه شیست، گنایس، مرمر و آمفیبولیت می‌باشند. قدیمی‌ترین واحدهای رسوبی موجود در منطقه شامل ترادفی از شیل، ماسه سنگ اسلیتی و فیلیتی (سازند تاشک) است که به طور ناپیوسته توسط نهشته‌های کربناتی - آواری - آتشفشانی مربوط به پرکامبرین-کامبرین زیرین (سری ریزو) پوشیده شده است. بیشتر کانسارهای مگنتیت، آپاتیت، سرب و روی و اورانیوم در مجموعه ریزو قرار دارند. لذا این واحد از دیدگاه زمین‌شناسی اقتصادی حائز اهمیت است. البته همچنان که پیشتر گفته شد، این سری توسط (سامانی، ۱۳۷۱)، به نام سازند ساغند معرفی و به پنج بخش تفکیک شده است. به عقیده ایشان نهشته‌های واقعی ریزو، فاقد کانه‌زایی از این نوع بوده و اساساً جایگاه چینه‌شناسی آن به‌طور ناپیوسته و بر روی سکانس‌های ریفتی واحد سازند ساغند است. وی همچنین دو رخداد کافت‌زایی را در شکل‌گیری و نهشته شدن سنگ‌های کمپلکس‌های ساغند (۵۵۰-۷۵۰ میلیون سال پیش) مطرح می‌کند که با وجود شباهت‌های زیاد، اختلاف بارز و آشکاری باهم دارند که به مقادیر کم سنگ‌های حدواسط و بازیک، متاسوماتیسم بسیار ضعیف، کانه‌زایی متفاوت نظیر روی، سرب، آهن و منگنز (مانند سرب و روی کوشک، آهن و منگنز ناریگان) در سری دزو نسبت به ساغند اشاره می‌نماید. همچنین، فعالیت آتش-فشانی در سازند ساغند عمدتاً دوگانه با ترکیب حدواسط- مافیک و حدواسط- فلسیک با گرایش سدیک است حال آن‌که در سری دزو، ترکیب سنگ‌های آتشفشانی حدواسط- فلسیک با گرایش پتاسیک می‌باشد. همچنین (سامانی، ۱۳۷۱)، معتقد است که پس از تشکیل کافت اصلی (نهشته‌های ساغند)، توده‌های گرانیتوئیدی عمدتاً قلیایی (سدیک و پتاسیک) با قدمت بیش از ۵۸۳ میلیون سال، آخرین مرحله گرانیتی شدن پوسته ایران زمین است. در پی آن، شرایط سکوی قاره‌ای بر آن حاکم می‌گردد و بستر رسوبات پلاتفرمی- قاره‌ای کامبرین زیرین به حساب می‌آید. علاوه بر این، ایشان کانه‌زایی مگنتیت را با سنگ‌های اولترامافیک به سن ۸۲۷ میلیون سال مرتبط می‌داند (Stocklin, 1968). به جای سری ریزو از واژه‌ی سازند ریزو استفاده کرد و بر این باور است که این واحد سنگ

چینه‌ای، هم‌ارز زمانی سه سازند بایندور، سلطانیه و باروت است. بدین ترتیب سری ریزو از نظر سنی منحصر به پرکامبرین پسین نبوده و تغییرات سنی آن از پرکامبرین پسین تا کامبرین پیشین است. واحدهای سنگی متنوعی که در این بلوک و به خصوص منطقه مورد مطالعه گزارش شده است عبارتند از:

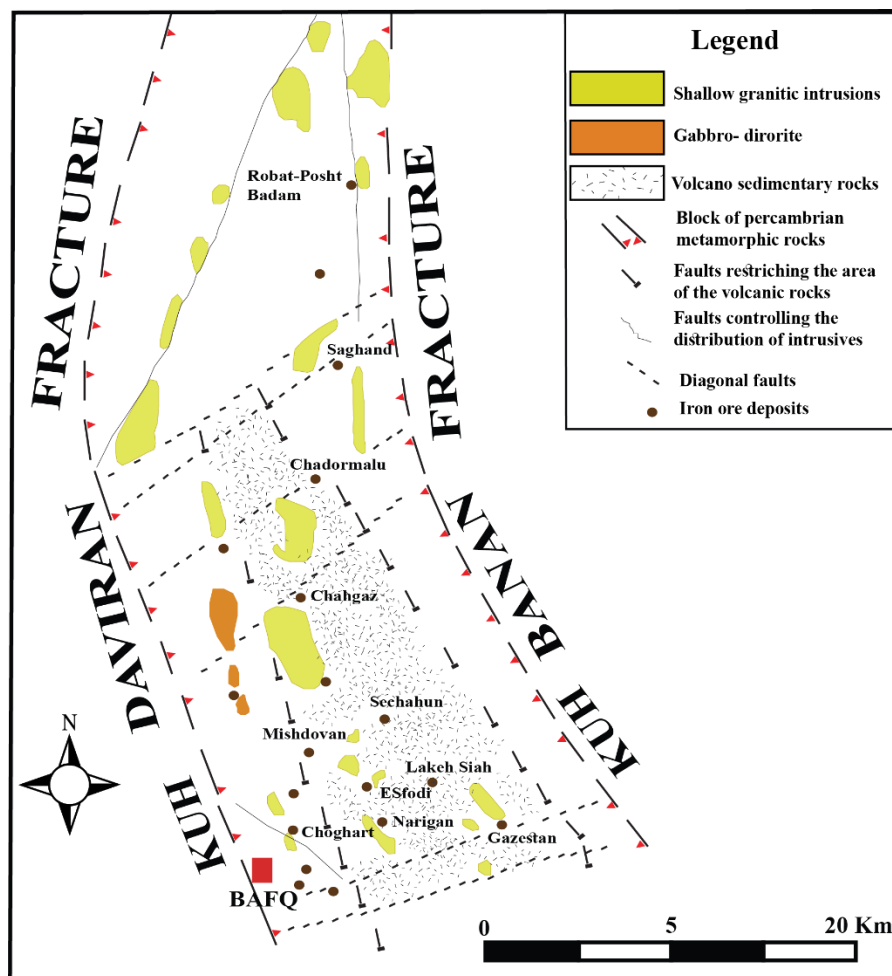
رسوبات متعلق به زمان پرکامبرین بالایی - کامبرین زیرین به صورت دگرشیب بر روی رسوبات قدیمی‌تر قرار گرفته و از دو بخش زیرین و فوقانی تشکیل شده است. بخش زیرین شامل دولومیت، سنگ‌آهک شیلی، ماسه‌سنگ، گدازه‌های فلسیک، شیل‌های آهکی و شیل می‌باشد. در قسمت غرب منطقه اسفوردی این واحدهای سنگی تفکیک پذیر نبوده و روی هم رفته مانند یک واحد دیده می‌شوند (سری ریزو). بخش بالایی بیشتر کربناته بوده و کم و بیش در خور قیاس با سازند سلطانیه است. نهشته‌های زمان پرمین در جنوب روستای شیطور واقع در جنوب شرقی منطقه برونزد دارند. در شمال شیطور، این رسوبات بیشتر از کربنات با میان لایه‌هایی از شیل و ماسه‌سنگ می‌باشد، در حالی که در جنوب روستای شیطور نهشته‌های این زمان همگی کربناتی بوده اند و ضخامت بیشتری دارند.

در بلوک پشت بادام، ردیف‌های تریاس بالایی - ژوراسیک میانی (گروه شمشک) به خوبی چین خورده و نشانگر نوعی دگرگونی دینامیک است. دگرشکلی یاد شده و ماگمازایی ژوراسیک میانی (گرانیت شیرکوه) مدیون یک رویداد زمین‌ساختی از نوع کوهزایی است. به همین رو در این بلوک ردیف‌های دوگر میانی - مالم وجود ندارند و سنگ‌های کرتاسه، با دگرشیبی زاویه‌دار، ردیف‌های کهن‌تر از ژوراسیک میانی - بالایی را می‌پوشاند. ساختار بلوکی ناشی از رویداد سیمیرین میانی سبب شده تا در این بلوک، سنگ‌های کرتاسه دو رخساره تفاوت داشته باشند. ابتدا رخساره‌های فلیشی که در حوضه‌های فروافتاده فروبومی نهشته شده‌اند و دوم، رخساره کربنات‌های سکویی که نشانگر دریا‌های باز ولی ژرفا است (آقنباتی، ۱۳۸۳). رسوبات آواری زمان ژوراسیک در شمال شرقی و مرکز منطقه اسفوردی برونزد دارد. این رسوبات بیشتر از شیل و ماسه‌سنگ‌های کوارتزی و گهگاه از شیل‌های سیاه رنگ زغال‌دار تشکیل شده‌اند. این رسوبات هم‌ارز سازند شمشک است.



در بلوک پشت بادام، رخساره‌های سکویی کرتاسه به طور عمده محدود به کرتاسه پایینی است و به جز سنگ‌های سنومانین، سنگ‌های کرتاسه بالایی وجود ندارند. در این بلوک ردیف‌های آواری، سنگ‌آهک‌های اربیتولین‌دار، کنگلومرا و ماسه سنگ‌های سرخ رنگ (سازند سنگستان) است که به تدریج به ردیف‌های کربناتی (سازند تفت) در برش‌های کامل به شیل‌های آمونیت‌دار آلبین (سازند دره انجیر) می‌رسد (آقنابتی، ۱۳۸۳).

بلوک پشت بادام از نظر کانه‌زایی آهن بسیار حائز اهمیت است، به طوری که بیش از ۳۴ آنومالی مهم آهن در محدوده‌ای به وسعت ۷۵۰۰ کیلومترمربع با ذخیره بالغ بر ۲ میلیارد تن سنگ آهن وجود دارد (NISCO, 1971). از دیگر کانسارهای موجود در منطقه، می‌توان به سرب و روی، اورانیوم، مولیبدن، فسفات، باریت، فلدسپات، بنتونیت، سنگ‌های تزئینی، و آلونیت اشاره کرد (مجیدی و باباخانی، ۱۳۷۹). کانسارهای آهن - آپاتیت بلوک پشت بادام توسط پژوهشگران مختلف مورد بررسی قرار گرفته و در مواردی به تمرکز عناصر خاکی کمیاب در آن‌ها اشاره شده است (Boomeri, 2012; Daliran, 1990; Förster and Jafarzadeh, 1984; Jami, 2006; Mokhtari and Emami, 2008; Taghipour et al., 2015; درویش زاده، ۱۳۶۲؛ سامانی، ۱۳۷۷؛ سامانی و باباخانی، ۱۳۶۹؛ سامانی، ۱۳۷۸؛ عابدیان، ۱۳۶۲؛ رجب زاده و همکاران، ۱۳۹۳؛ مختاری و امامی، ۱۳۸۲؛ مختاری و رحمانی، ۱۳۸۱).



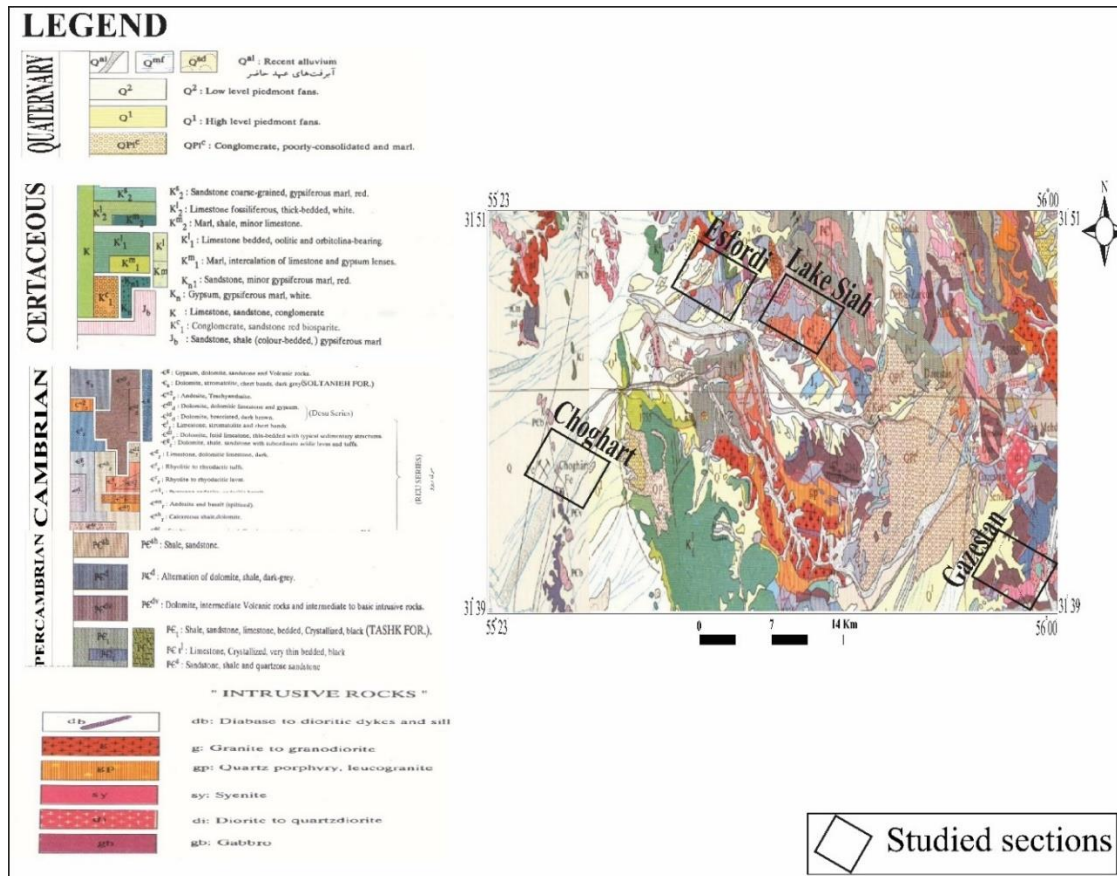
شکل ۲-۲: نقشه ساختاری بلوک فلزائی پشت بادام که توسط دو گسل کوه بنان و دویران احاطه شده است. با تغییرات از (NISCO, 1971)

## ۲-۳- زمین‌شناسی مناطق معدنی

### ۲-۳-۱- مقدمه

منطقه‌ی مورد مطالعه بخشی از بلوک پشت بادام از خرد- قاره‌ی ایران مرکزی می‌باشد. این منطقه بخش کوچکی از ورقه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی (Soheili and Mahdavi, 1991) و بافق (امینی، ۱۳۸۳) را در بر می‌گیرد. در راستای پژوهش حاضر، منطقه‌های معدنی اسفوردی، گزستان، لکه‌سیاه و چغارت از نظر زمین‌شناسی، سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی و ژئوشیمی مطالعه شده است. حدود جغرافیایی منطقه‌های مذکور در نقشه زمین‌شناسی (شکل ۲-۳) نشان داده شده است. در ادامه بر پایه‌ی شواهد زمین‌شناسی صحرایی، سنگ‌شناسی و اطلاعات نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ راور

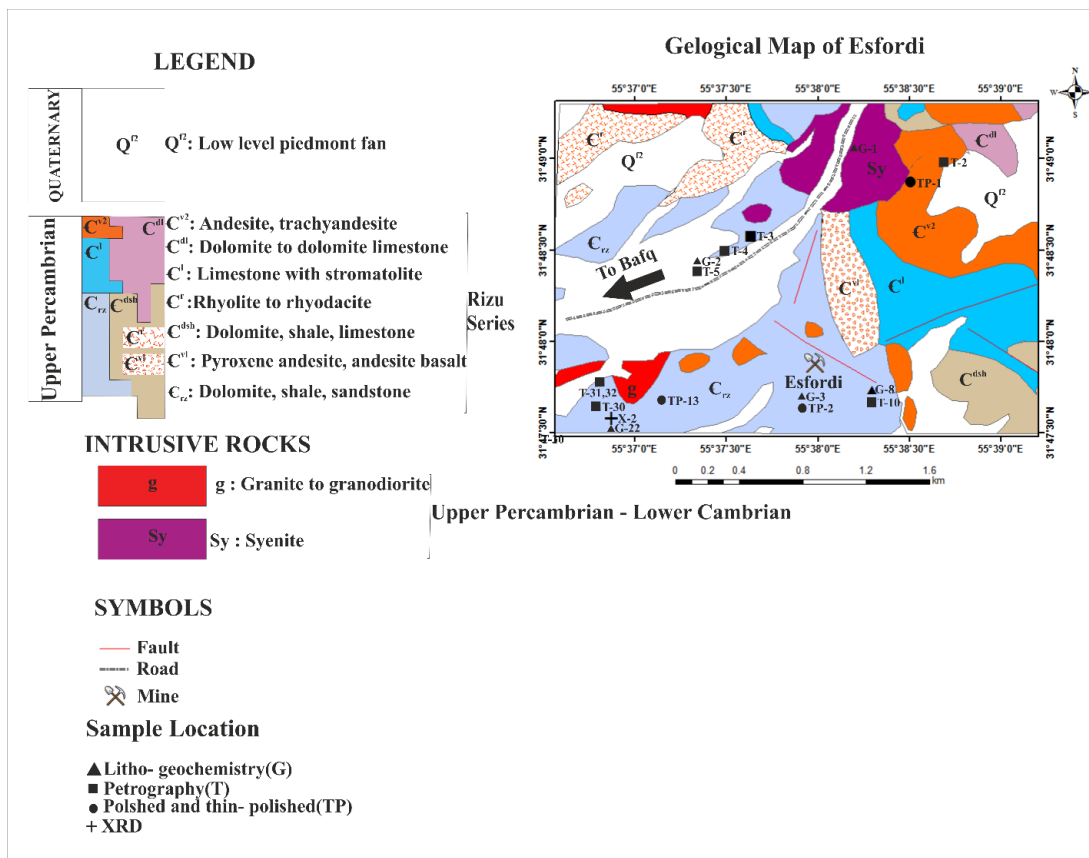
و یزد و نقشه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی و بافق، زمین‌شناسی هریک از محدوده‌های معدنی اسفوردی، گزستان، لکه سیاه و چغارت به طور جداگانه در زیر توصیف می‌گردد.



شکل ۲-۳. نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه برگرفته از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ راور (Mahdavi, 1996) و یزد (Nabavi, 1972).

### ۲-۳-۲- زمین‌شناسی منطقه معدنی اسفوردی

بر اساس مشاهدات زمین‌شناسی صحرائی و اطلاعات نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی (Soheili and Mahdavi, 1991)، واحدهای سنگ‌شناسی که در منطقه اسفوردی رخمون دارند، به صورت زیر می‌باشد:



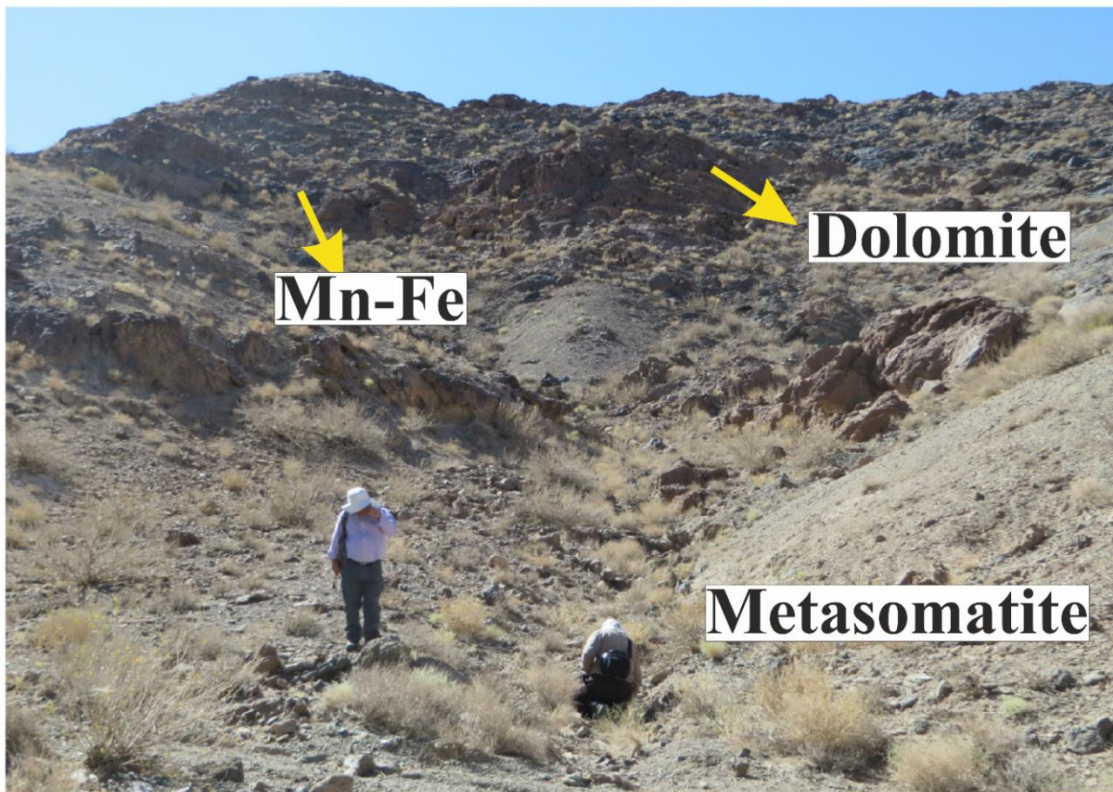
شکل ۲-۴: نقشه زمین‌شناسی منطقه معدنی اسفوردی، با تغییر از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی (Soheili and Mahdavi, 1991).

## ۲-۳-۱- سازندهای زمین‌شناسی پرکامبرین بالایی - کامبرین زیرین (سری ریزو)

نام سری ریزو از دهکده ریزو در شمال غرب ناحیه کرمان گرفته شده است. تاکنون برش اصلی مشخصی از این سری گزارش نشده است، ولی بیرون زدگی‌هایی از این سازند در نزدیکی دهکده ریزو و برشی نیز در ۲۰ کیلومتری غرب-شمال غرب کرمان (آب مراد)، مطالعه شده است. سن سازند ریزو را به نئوپروتوزوئیک پسین - کامبرین پیشین نسبت می‌دهند که هم‌ارز دولومیت‌های سلطانیه و سازند باروت است. بخش قاعده‌ای این سازند دولومیت است و روی آن شیل و ماسه سنگ‌های شیلی سبز و قرمز و سپس سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری قرار دارد. روی این مجموعه را دولومیت‌های چرت‌دار متعلق به سری دزو می‌پوشانند (Samani, 1993; Soheili and Mahdavi, 1991). جمی (Jami, 2006) توالی آتشفشانی-رسوبی منطقه معدنی اسفوردی را نسبت به موقعیت کانه‌زایی آپاتیت-مگنتیت به سنگ‌های کمر بالا و کمر پایین تقسیم نموده‌اند. توالی کمر بالا غالباً از سنگ‌های آتش-

فشانی- آواری، گدازه‌های تراکیتی و بازالتی و میان لایه‌های سنگ‌آهک، ماسه‌سنگ، شیل و ژاسپیلیت، دم‌های ریولیتی، سنگ‌آهک و دولومیت توده‌ای ترکیب یافته است و توالی کمر پایین از توف ریولیتی با میان لایه‌هایی از سنگ‌های آتش‌فشانی- آواری و نفوذی‌های مافیک، دولومیت، سنگ‌آهک، شیل، و ماسه سنگ توفی تشکیل شده است.

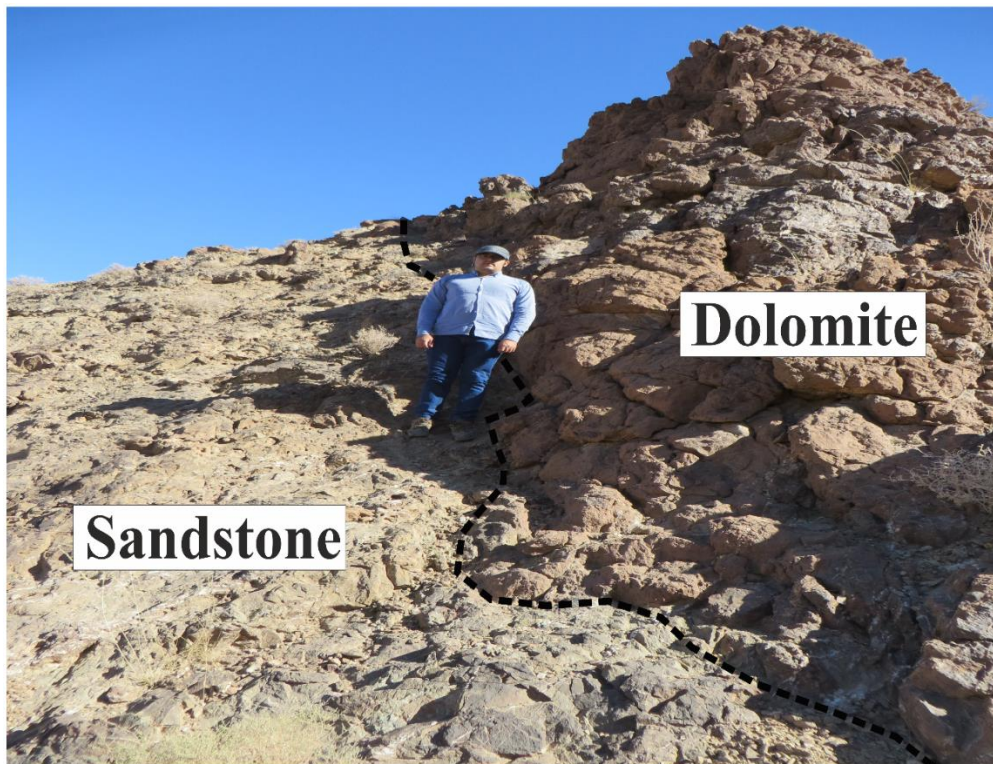
در منطقه اسفوردی، سری ریزو تناوبی از سنگ‌های دولومیتی، ماسه سنگ، ماسه سنگ توفی، شیل، گدازه، و توف‌های بازالتی، گدازه و توف‌های ریولیتی، ریوداسیتی تا آندزیتی، متاسوماتیت‌ها، نوارهایی از چرت‌های آهن‌دار (ژاسپیلیت) و اکسیدهای آهن- منگنز و نیز کانه‌زایی‌های آپاتیت و مگنتیت را شامل می‌گردد (شکل ۲-۵) که در ادامه هر یک از واحدهای سنگی سری ریزو در منطقه اسفوردی به طور جداگانه توصیف می‌شود.



شکل ۲-۵ توالی از دولومیت مرمری شده، سنگ‌های متاسوماتیتی به همراه افق‌های منگنز و آهن (نگاه به جنوب- جنوب‌شرق)

## واحد دولومیتی و ماسه‌سنگی:

سری ریزو در این منطقه شامل میان لایه‌هایی از دولومیت و ماسه‌سنگ است. گسترش این واحدهای سنگی در بخش‌های قاعده‌ای سری ریزو بیشتر از سایر بخش‌های آن می‌باشد. دولومیت‌ها در نتیجه دگرگونی، تبلور مجدد پیدا کرده و به مرمی‌های دولومیت بدل شده‌اند و گرهک‌ها و نوارهایی از چرت را دارا می‌باشند. رگه و رگچه‌هایی از کلسیت و دولومیت آن‌ها را در جهات مختلف قطع می‌نماید. ضخامت لایه‌های دولومیت در توالی رسوبی از حد سانتی‌متر تا بیش از ۳ متر متغیر است. لایه‌های دولومیت بعضاً عدسی و لایه‌هایی از اکسیدهای آهن و منگنز را در برمی‌گیرد (شکل ۲-۹). ماسه سنگ‌ها با مرز مشخص با دولومیت در توالی رسوبی مشاهده می‌گردد، و ترکیب آنها گاهاً به ماسه سنگ توفی تمایل نشان می‌دهد. این سنگ‌ها به رنگ خاکستری تا قهوه‌ای و دارای بافت دانه ریز تا دانه متوسط بوده و در نتیجه دگرگونی به ماسه سنگ کوارتزیتی تبدیل شده‌اند. رگه رگچه‌هایی از کوارتز در ماسه سنگ‌ها مشاهده می‌گردد (شکل ۲-۶). میان لایه‌هایی از شیل نیز در توالی وجود دارد.



شکل ۲-۶: مرز میان واحد مرمی دولومیتی شده با ماسه‌سنگ کوارتزیتی در سری رسوبی - آتشفشانی ریزو (نگاه به سمت شمال شرق).

## گدازه و توف بازالتی:

این واحد از بخش‌های فراگیر در سری ریزو است و عمدتاً در بخش‌های غرب و شمال غرب محدوده اسفوردی مشاهده می‌گردد. توف‌های بازالتی دارای رنگ سبز تا سبز تیره بوده و این سنگ‌ها با متاسوماتیت‌ها دارای کنتاکت می‌باشند. مشاهدات صحرایی نشان می‌دهد که سنگ‌های بازالتی به دور از مناطق کانه‌زایی و توده‌های نفوذی درجات پایینی از دگرگونی و متاسوماتیسم را متحمل شده‌اند به طوری که ترکیب کانی‌شناسی و بافت اولیه خود را حفظ کردند (شکل ۲-۷).

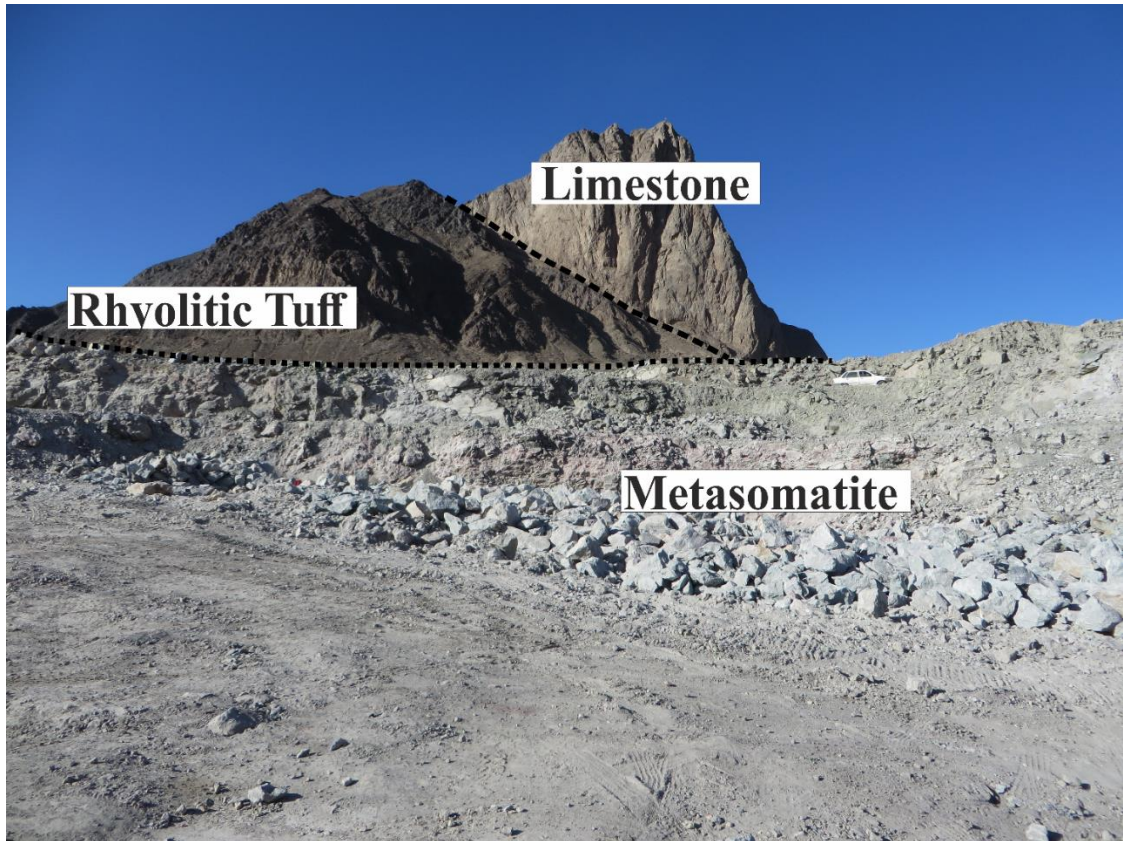


شکل ۲-۷: الف) رخنمون لایه بازالتی به ضخامت ۴ متر در میان دولومیت، ماسه سنگ و توف شیلی (نگاه به سمت جنوب- جنوب شرق)، و ب) گدازه بازالتی در داخل متاسوماتیت‌ها (نگاه به سمت شمال شرق).

### متاسوماتیت‌ها:

این سنگ‌ها بخش عمده و مهمی از سری ریزو را در منطقه فلززایی بافق و منطقه معدنی اسفوردی به خود اختصاص می‌دهند (شکل ۲-۱) و میزبان کانه‌زایی‌های آهن و آپاتیت می‌باشند (شکل ۲-۱۱). اظهار نظر در مورد ترکیب اولیه سنگ‌های منشا آن‌ها خیلی آسان نیست چون که سنگ‌های والد آن‌ها درجات بالایی از متاسوماتیسم را پشت سر گذاشته‌اند. با وجود این، مشاهدات صحرایی و سنگ‌نگاری نشان می‌دهد که سنگ‌های والد آن‌ها سنگ‌های آتش‌فشانی-رسوبی سری ریزو (به ویژه توف-های ریولیتی تا ریوداسیتی) می‌باشد، که در نتیجه نفوذ توده‌های آذرین فلسیک تا مافیک فرایندهای گرمایی ناشی از این توده‌ها و نیز رخداد‌های تکتونیکی دچار متاسوماتیسم شدید شده‌اند. در این منطقه و در همبری توده‌های نفوذی (به ویژه سینیت‌ها) و نیز کانه‌زایی‌های آهن و آپاتیت، سنگ‌های

سبز (متاسوماتیت‌ها) بیشترین رخنمون سطحی را دارند و این دلالت بر ارتباط تشکیل متاسوماتیت‌ها را با نفوذی‌های آذرین و کانه‌زایی‌های منطقه است (شکل ۲-۸).



شکل ۲-۸: گدازه ریولیتی به همراه سنگ‌آهک و متاسوماتیت‌ها دارای کانه‌زایی آپاتیت و آهن در محدوده معدن آپاتیت اسفوردی (نگاه به سمت شمال - شمال شرق).

### گدازه و توف‌های ریولیتی تا آندزیتی:

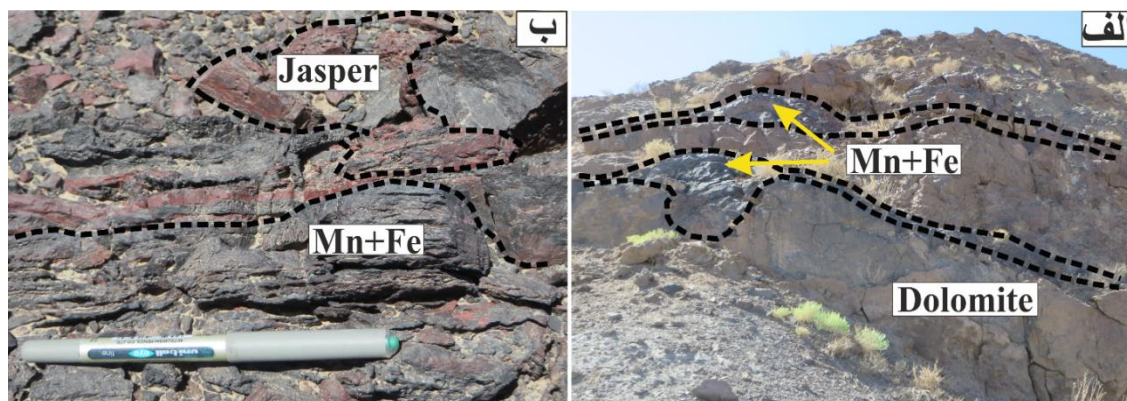
در سری ریزو گدازه و توف با ترکیب ریولیت، آندزیت و آندزیت بازالتی مشاهده می‌گردد. این سنگ‌ها به صورت بین لایه‌ای با سایر واحدهای سنگی سری ریزو و نیز به صورت لایه‌های منفرد و یا دم‌های آتشفشانی تشکیل شده‌اند. وجود این سنگ‌های آتشفشانی بیانگر فعالیت‌های آتشفشانی زیر دریایی همزمان با رسوب گذاری در محیط‌های ریفتی پرکامبرین بالایی است. از ویژگی‌های صحرایی برخی گدازه‌های ریولیتی- آندزیتی تشکیل مناطق صخره‌ای و توپوگرافی برجسته می‌باشد و عمدتاً در بخش‌های کمر بالای سنگ‌های سبز (متاسوماتیت‌ها) قرار می‌گیرند و به نوبه‌ی خود کلید زمین-



شناسی صحرایی برای اکتشاف کانسارهای آهن و آپاتیت می‌باشند. به احتمال زیاد این گدازه‌ها تظاهر سطحی توده‌های نفوذی فلسیک- حدواسط (گرانیت‌ها و سینیت‌ها) هستند (شکل ۲-۸).

### کانه‌زایی نواری منگنز-آهن:

در سری ریزو علاوه بر واحدهای سنگی مذکور، لایه و نوارهایی از اکسیدهای منگنز، آهن و سیلیس-های آهن‌دار (ژاسپیلیت) وجود دارد. این نوارها عموماً در واحدهای مرمر دولومیتی و گدازه و توف‌های بازالتی مشاهده می‌گردد. نمونه‌ای از این مکان با شماره (BE-TP-13) و مختصات جغرافیایی (X=368631, Y=3518352) جهت مطالعات کانه‌نگاری برداشت شد. پیرولوسیت، مگنتیت‌های هماتیتی شده به همراه هماتیت، و گوتیت ترکیب کانی‌شناسی غالب آن‌ها را تشکیل می‌دهد. ضخامت لایه‌های منگنز و آهن از حد چند سانتی‌متر تا بیش از ۱ متر متغیر است (شکل ۲-۹).



شکل ۲-۹: الف) افق‌های آهن و منگنز در توالی دولومیت‌ها (نگاه به سمت جنوب-جنوب شرق)، و ب) توالی آهن،

منگنز و ژاسپیلیت.

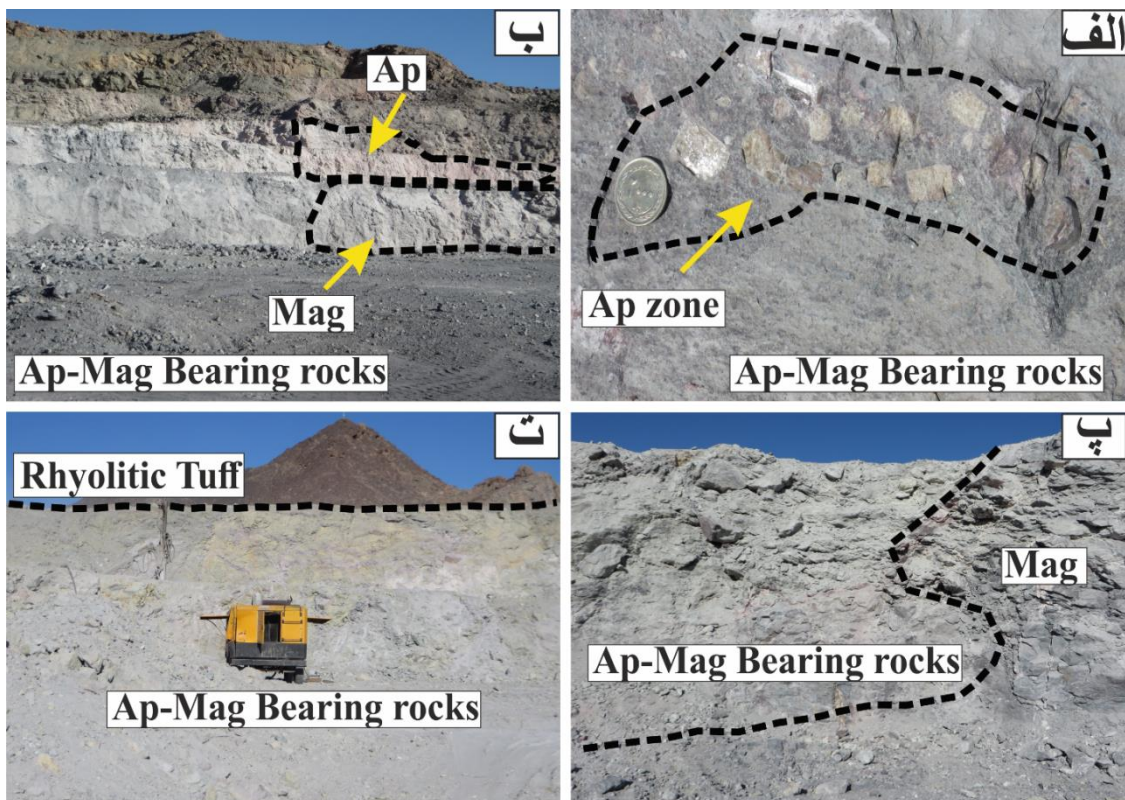
در قسمت‌های سطحی نوارهای آهن- منگنز و سیلیس‌های آهن‌دار که به وسیله گدازه‌های بازالتی میزبانی می‌شوند، کانه ثانویه سولفات منیزیوم آبدار مشاهده می‌گردد که در نتیجه فرایندهای سطحی هوازدگی و تبخیر تشکیل می‌گردد. از این قسمت یک نمونه با شماره (BE-X-2) و مختصات جغرافیایی (X=368631, Y=3518352) جهت مطالعات XRD برداشت شد. بر اساس نتایج XRD، فازهای اصلی این نمونه شامل اپسومیت (سولفات منیزیوم آبدار)، هماتیت و گوتیت و فازهای فریبی شامل کوارتز و کلسیت هستند (شکل ۲-۱۰).



شکل ۲-۱۰. الف) توالی ژاسپیلیت با اکسیدهای منگنز - آهن نواری که بر روی آن‌ها کانی ثانویه اپسومیت تشکیل شده است، و ب) تصویر نزدیک از کانی اپسومیت.

### کانسنگ‌های آپاتیت و مگنتیت اسفوردی:

سنگ‌های متاسوماتیتی در سری ریزو میزبان کانه‌زایی آپاتیت و اکسیدهای آهن (عمدتاً مگنتیت) می‌باشد. کانسار اسفوردی بر اساس فراوانی کانی‌های آپاتیت و مگنتیت به بخش‌های غنی از آپاتیت، آپاتیت-مگنتیت، مگنتیت، و اکتینولیت تقسیم می‌گردد (شکل ۲-۱۱ الف، ب، پ، ت). در ارتباط با کانه‌زایی‌های آهن و آپاتیت منطقه در فصل‌های بعدی با جزئیات بیشتر بحث خواهد شد.



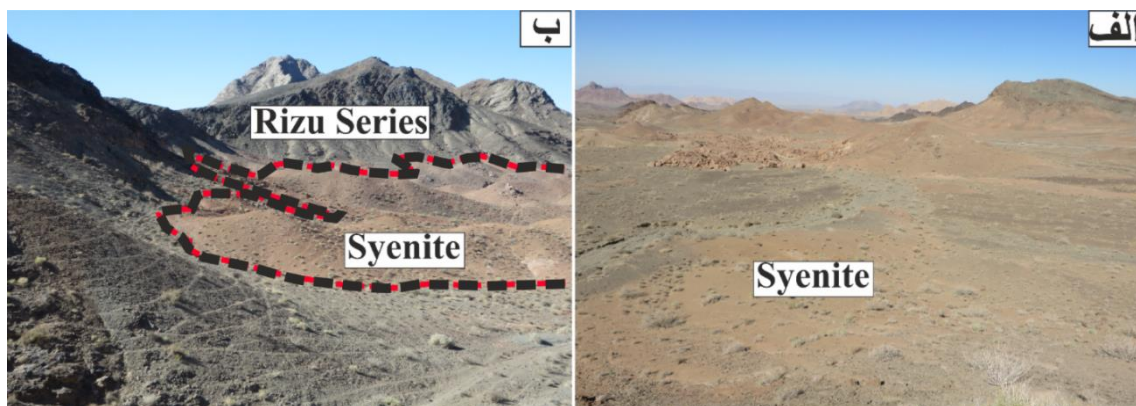
شکل ۲-۱۱: الف) بخش غنی از آپاتیت در داخل سنگ‌های سبز (متاسوماتیت‌ها)، ب) بخش‌های آپاتیته، آپاتیت - مگنتیت، و مگنتیته در متاسوماتیت‌ها، پ) بخش غنی از مگنتیت متاسوماتیت‌ها، و ت) متاسوماتیت‌های غنی از آپاتیت و مگنتیت در همبری با گدازه‌های ریولیتی (نگاه به سمت شمال-شمال غرب).

### ۲-۲-۳-۲- سنگ‌های نفوذی منطقه معدنی اسفوردی

در منطقه معدنی اسفوردی سنگ‌های آذرین درونی به صورت توده و دایک مشاهده می‌گردد. ترکیب سنگ‌شناسی و شیمیایی آن‌ها از فلسیک تا حدواسط می‌باشد. این سنگ‌ها در سری آتشفشانی-رسوبی ریزو تزریق شده و در فرایند دگرگونی، متاسوماتیسم و کانه‌زایی آهن، فسفر و عناصر کمیاب نقش داشته‌اند. توده‌های نفوذی (به ویژه سینیت) در تماس خود با سنگ‌های کربناتی، آواری و آتش-فشانی سبب ایجاد مناطق اسکارنی در مقیاس محلی شده‌اند. بر پایه مشاهدات صحرایی و مطالعات سنگ‌نگاری جنس سنگ‌های نفوذی منطقه معدنی اسفوردی سینیت، گرانیت و دیاباز است، که در زیر سنگ‌های سینیتی و گرانیتی به طور جداگانه توصیف می‌گردد. دیاباز به صورت دایک‌های کوچک، توالی‌های آتشفشانی-رسوبی منطقه را قطع می‌نماید، و از آنجا که نمونه‌ای از آن‌ها در این مطالعه گرفته نشده است از توصیف سنگ‌شناسی آن‌ها صرف نظر می‌گردد.

## سینیت:

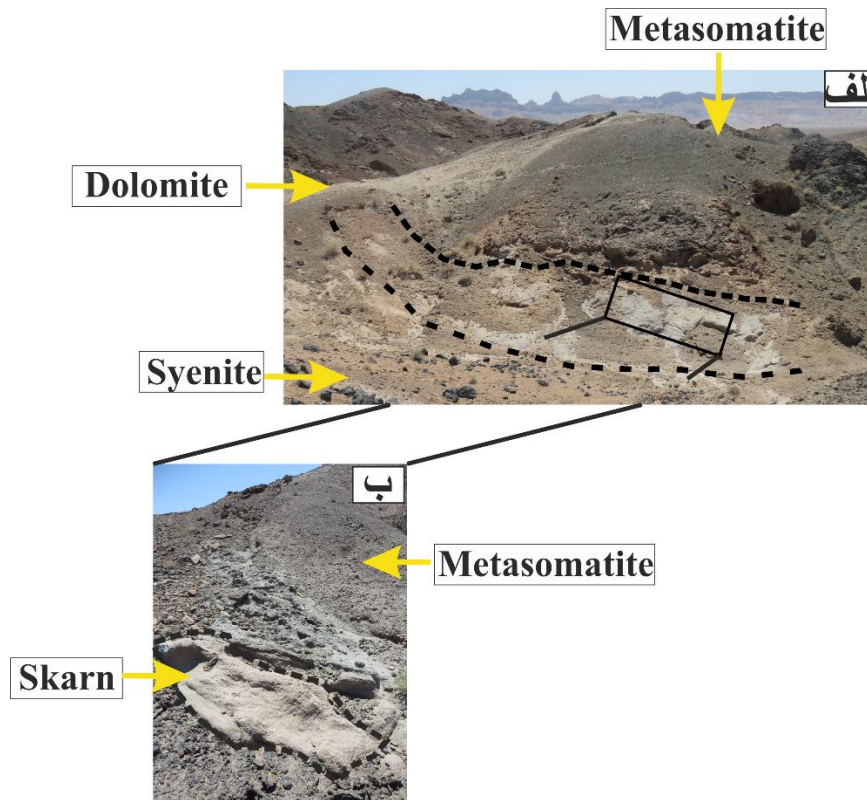
اولین نمونه برداشت شده از منطقه اسفوردی مربوط به توده نفوذی سینیتی با شماره سریال (BE-T-1) و مختصات جغرافیایی ( $X=370982$ ,  $Y=3520833$ ) است. سینیت از توده‌های آذرین نفوذی مهم در منطقه فلززایی بافق می‌باشد و از گسترش قابل توجهی در منطقه معدنی اسفوردی برخوردار است. میزبان سینیت واحدهای سنگی سری ریزو است. بر اساس مطالعات سنگ‌نگاری، سینیت‌ها سنگ‌های آذرین درونی حدواسطی هستند که از اوژیت، ارتوکلاز، هورنبلند، و بیوتیت‌های آهن‌دار (آنیت) در یک بافت همسان‌دانه تشکیل شده‌اند. به لحاظ شکل ظاهری سینیت‌ها به رنگ کرم تا صورتی و با دانه بندی درشت تا متوسط دیده می‌شود (شکل ۲-۱۲).



شکل ۲-۱۲: الف) رخنمون گسترده توده سینیتی در منطقه مورد مطالعه (نگاه به سمت شرق - جنوب شرق)، و ب) محل تماس توده سینیتی با توالی سری ریزو (نگاه به سمت جنوب).

در محل تماس سینیت‌ها با سنگ‌های آتشفشانی - رسوبی سری ریزو به طور محلی مناطق اسکارنی مشاهده می‌گردد (شکل ۲-۱۳). نمونه‌ای با شماره سریال (BE-T-31) و مختصات جغرافیایی ( $X=368664$ ,  $Y=3518386$ ) از این منطقه برداشت شده است. بر اساس نتایج XRD از مناطق اسکارنی، بخش‌های اصلی تشکیل دهنده آن‌ها کوارتز و مسکویت هستند و فاز جزئی آنها هماتیت است. همچنین در لایه‌های کربناته اسکارنیشده دانه‌های ریزی از گارنت به رنگ حنایی دیده می‌شوند. مطالعات سنگ‌نگاری نشان می‌دهد که کوارتز که بعضاً به صورت خلیجی هستند به همراه مسکویت و فلدسپات در زمینه‌ای از کانی‌های رسی قرار گرفته‌اند. بررسی‌های صحرائی نشان می‌دهد که میان توده‌های نفوذی سینیتی و کانه‌زایی‌های آهن - آپاتیت (به‌ویژه آپاتیت‌زایی) ارتباط معنی‌داری وجود

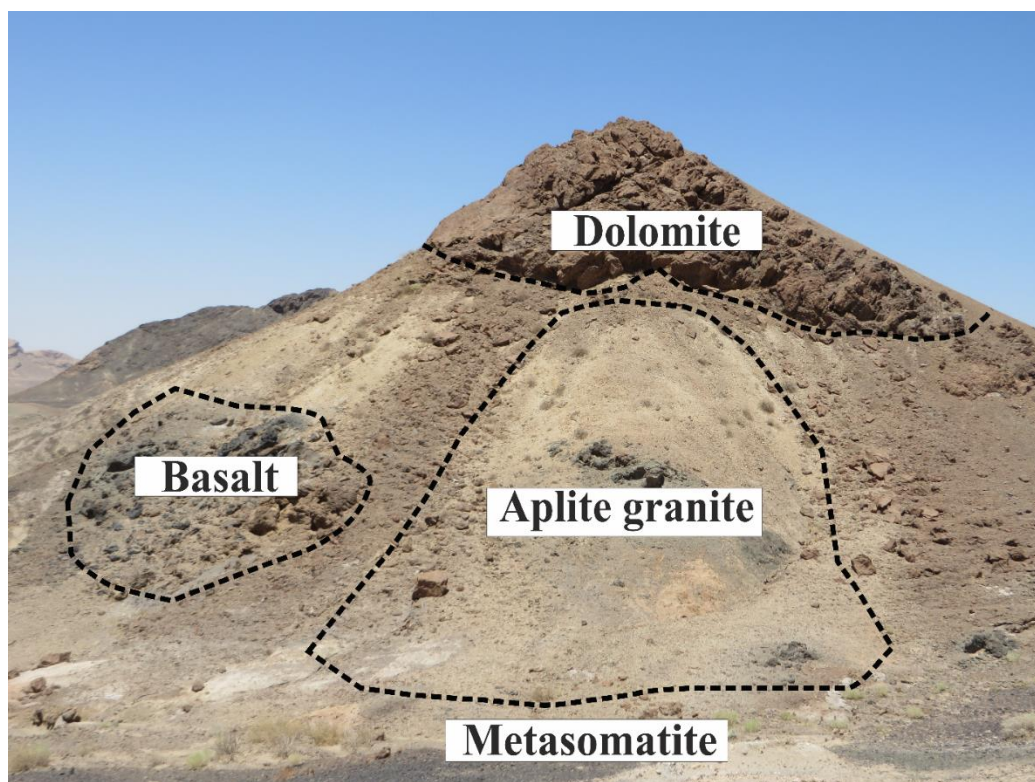
دارد و به احتمال خیلی زیاد مذاب‌های غنی از سیلیسی و مذاب‌های غنی از فسفر و آهن محصول تفریق یافته یک ماگمای مافیکی آکالن می‌باشند.



شکل ۲-۱۳: تماس توده سینیتی با دولومیت‌های مرمری شده و متاسوماتیت‌ها که منجر به تشکیل سنگ‌های اسکارن در مقیاس محلی شده است.

### گرانیت:

نمونه‌ای با شماره سریال (BE-T-30) و مختصات جغرافیایی (X=368591, Y=3518359) از این محل برداشت شده است. گرانیت به صورت دایک و توده‌های کوچک آپلیتی در سنگ‌های سری ریزو (به ویژه درون متاسوماتیت‌ها) مشاهده می‌گردد. در نمونه‌های دستی این سنگ به رنگ سفید تا کرم دیده می‌شوند. بر پایه مطالعات سنگ‌نگاری این سنگ از کوارتز، آکالی‌فلدسپار و پلاژیوکلاز تشکیل یافته است و محصول نهایی تفریق ماگماهای مافیکی می‌باشند و با توده‌های گابرویی، دیوریتی، سینیتی و گرانیتی منطقه فلززایی بافق هم‌ماگما می‌باشند (شکل ۲-۱۴).

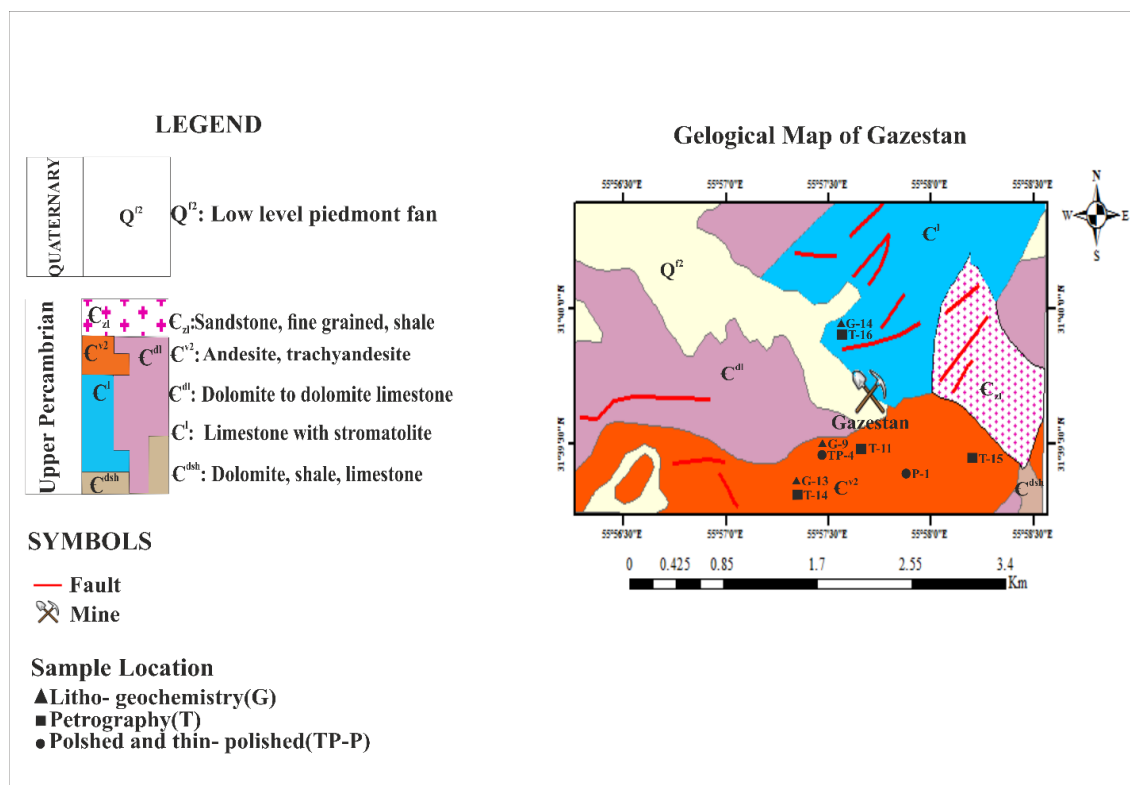


شکل ۲-۱۴: توالی دولومیت، متاسوماتیت‌ها، و گدازه بازالتی که در داخل آن‌ها دایک‌های آپلایت گرانیت تزریق شده است.

### ۲-۳-۳- زمین‌شناسی منطقه معدنی گزستان

مطالعات زمین‌شناسی و اکتشافی سیستماتیک بر روی کانه‌زایی آهن-آپاتیت گزستان توسط معاونت اکتشافی سازمان زمین‌شناسی کشور انجام شده است (دُری و همکاران، ۱۳۸۷؛ دُری و جمالی، ۱۳۸۲). در این بررسی‌ها واحدهای سنگی موجود در منطقه معدنی گزستان در دو بخش اصلی تقسیم بندی شده است: الف) واحدهای آذرآواری و آتشفشانی سری ریزو (کامبرین زیرین): شیل، ماسه‌سنگ، کربنات و لایه‌های ایگنمبریت از سازنده‌های سری ریزو هستند، که به طور معمول، سنگ‌های کربناتی در زیر، شیل و ماسه سنگ در وسط و سنگ‌های آتشفشانی ریولیتی بنفش رنگ، تراکیت، تراکی‌آندزیت، الیوین بازالت و توف در بالا قرار دارند. سنگ‌های آتشفشانی این منطقه، طیف ترکیبی گسترده‌ای را از آندزیت، تراکی‌آندزیت، ریولیت، داسیت، همراه با توف آندزیتی و توف تراکیتی شامل می‌شوند، و ب) توده‌های نفوذی نیمه‌آتشفشانی: که دامنه‌ای از گرانودیوریت و

میکروگرانیت را شامل می‌شوند. افضلی و همکاران (۱۳۹۳) و حافظیان و جمالی (۱۳۹۴)، اطلاعات زمین‌شناسی مشابهی را برای منطقه معدنی گزستان عنوان کرده‌اند. بر اساس مشاهدات زمین‌شناسی صحرایی پژوهش حاضر و اطلاعات نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی (Soheili and Mahdavi, 1991) واحدهای سنگ‌شناسی که در منطقه گزستان رخنمون دارند به صورت زیر می‌باشد (شکل ۲-۱۵).



شکل ۲-۱۵: نقشه زمین‌شناسی منطقه معدنی گزستان با تغییرات از (Soheili and Mahdavi, 1991).

۳-۳-۱- سازندهای زمین‌شناسی پرکامبرین بالایی - کامبرین زیرین (سری ریزو) در منطقه گزستان، سری ریزو تناوبی از سنگ‌های دولومیتی و آهک دولومیتی، ماسه سنگ، شیل، متاسوماتیت‌ها، گدازه‌های ریولیتی، تراکی آندزیتی، آندزیتی و بازالتی، توف‌های ریولیتی، داسیتی، آندزیتی و بازالتی را شامل می‌شود، به طوری که سنگ‌های کربناتی و آواری به ترتیب در بخش‌های پایینی و سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری در بخش‌های بالایی سری ریزو قرار دارند (شکل ۲-۱۶). توده‌های نفوذی گرانیتی و دیوریتی و کانه‌زایی‌های آپاتیت و مگنتیت نیز در این منطقه وجود دارند.

در ادامه بر اساس شواهد صحرایی برخی از واحدهای سنگی این منطقه به‌طور جداگانه توصیف می‌گردد.

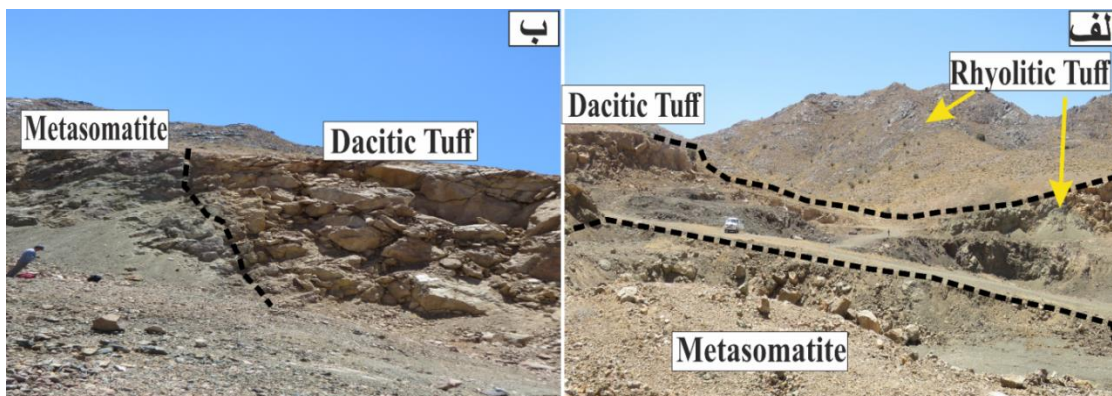


شکل ۲-۱۶: توالی از شیل، ماسه سنگ، دولومیت، متاسوماتیت و سنگ‌های آتشفشانی در سری ریزو در منطقه معدنی گزستان (نگاه به سمت شرق-شمال شرق).

#### متاسوماتیت‌ها:

همان‌طور که در توصیف زمین‌شناسی منطقه معدنی اسفوردی بیان گردید، این واحد سنگی بخش عمده و مهمی از منطقه فلززایی بافق را به خود اختصاص می‌دهد و میزبان کانه‌زایی‌های آهن و آپاتیت می‌باشد. بر اساس مشاهدات صحرایی متاسوماتیت‌ها در منطقه معدنی گزستان دارای مرز مشخصی با دولومیت‌ها و آهک دولومیتی، توف‌های ریولیتی تا داسیتی، و گدازه‌های آندزیتی تا بازالتی هستند (شکل‌های ۲-۱۷ و ۲-۱۸). سنگ‌های متاسوماتیتی به نوبه خود در نتیجه فرایندهای متاسوماتیکی از توف‌های ریولیت، داسیتی و بازالتی (به‌ویژه توف‌های ریولیتی تا ریوداسیتی) سری ریزو حادث شده است، و بسته به جنس سنگ والد ترکیب کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی آنها متغیر است. این سنگ‌ها میزبان توده‌های نفوذی گرانیتی، دیوریتی، گابرویی و دایک‌های دیابازی و کانه‌زایی‌های آهن-آپاتیت هستند.

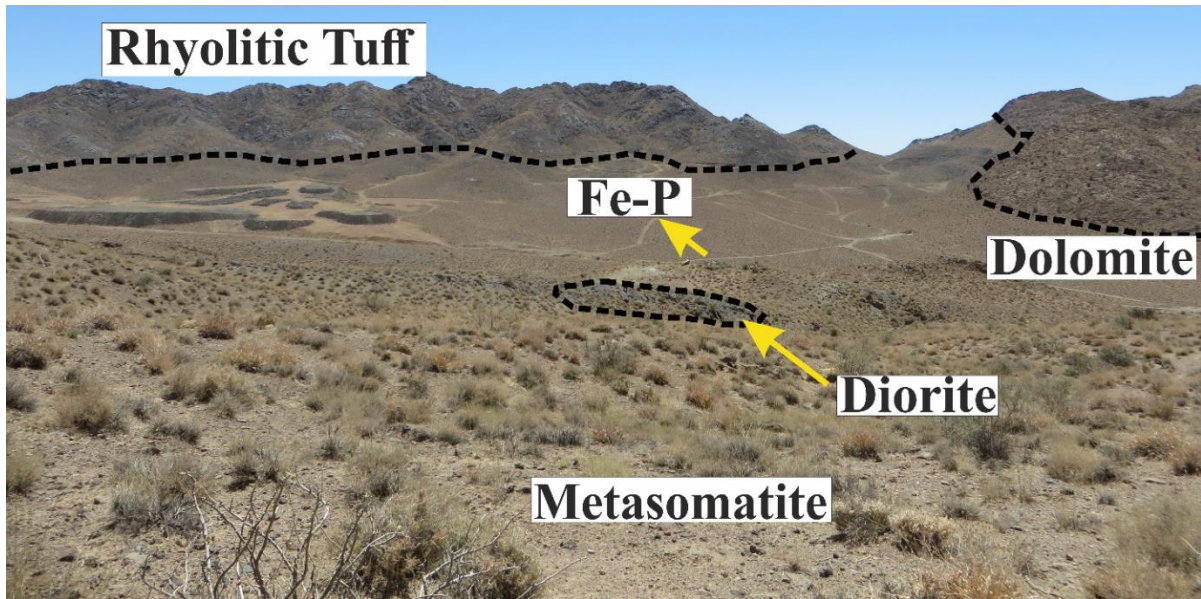




شکل ۲-۱۷: الف) تماس متاسوماتیت‌ها با توف‌های ریولیتی، داسیتی و گدازه‌های بازالتی تا بازالت آندزیتی، و ب) تماس متاسوماتیت‌ها با توف‌های داسیتی (نگاه تصویرها به سمت جنوب-جنوب‌شرق).

### گدازه‌های بازالتی تا بازالت آندزیتی:

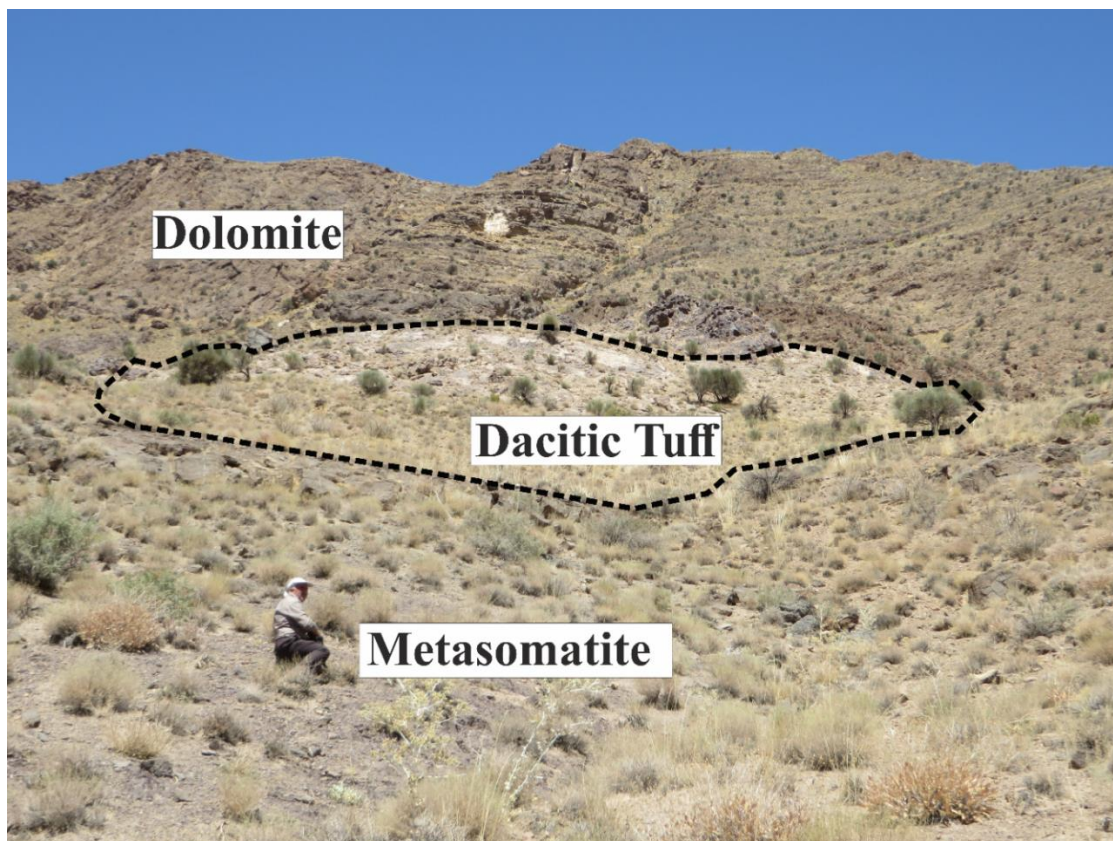
در منطقه گزستان گدازه‌های بازالتی تا بازالت آندزیتی نیز مشاهده می‌گردد، که در کمر بالای متاسوماتیت قرار گرفته‌اند. نمونه‌ای با شماره سریال (BG-T-12) و مختصات جغرافیایی (X=401305, Y=35028046) از این واحد برداشت شده است. وجود این سنگ‌های آتش‌فشانی بیانگر فعالیت‌های آتش‌فشانی زیر دریایی همزمان با رسوب‌گذاری در محیط‌های ریفتی پرکامبرین بالایی می‌باشد. از ویژگی‌های صحرایی این گدازه‌ها تشکیل مناطق صخره‌ای و توپوگرافی برجسته می‌باشد و عمدتاً در بخش‌های بالایی متاسوماتیت‌ها قرار دارند و کلید صحرایی برای اکتشاف کانسارهای آهن و آپاتیت می‌باشند. به احتمال زیاد این گدازه‌ها تظاهر سطحی توده‌های نفوذی فلسپیک- حدواسط (گرانیت‌ها و سینیته‌ها) هستند (شکل ۲-۱۸).



شکل ۲-۱۸: تصویری از منطقه معدنی گزستان که همبری متاسوماتیت‌ها، گدازه‌های بازالتی تا آندزیت بازالتی، دولومیت، و توده نفوذی دیوریت را نشان می‌دهد (نگاه به سمت جنوب).

### گدازه و توف‌های ریولیتی تا داسیتی:

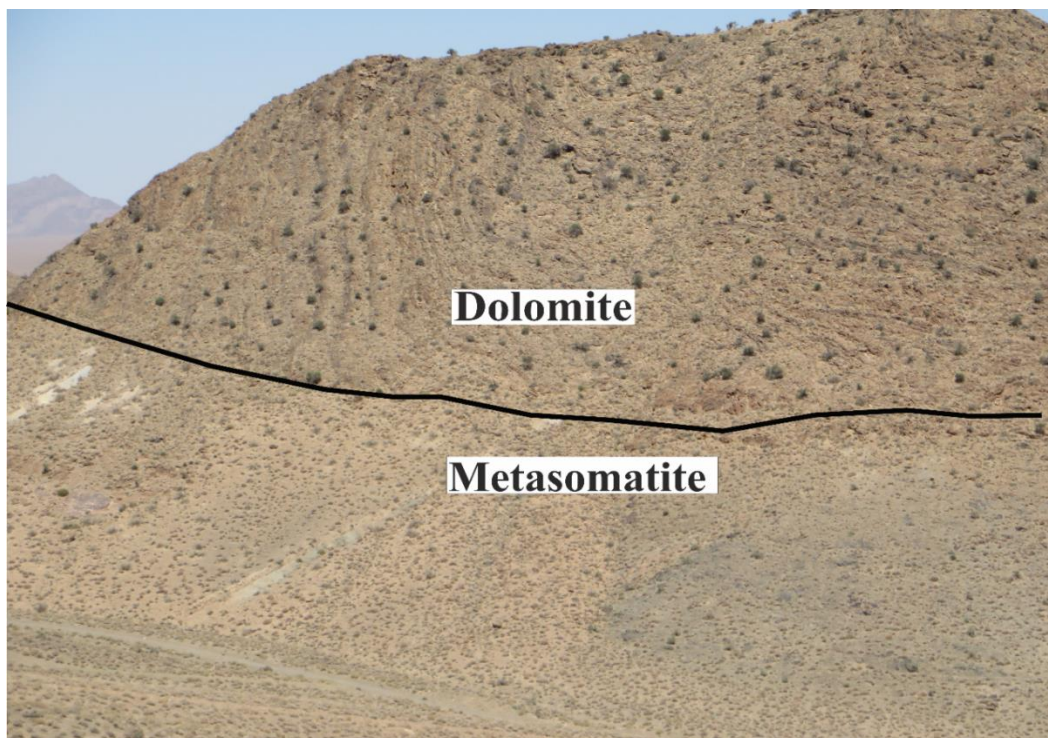
در منطقه گزستان توف‌های ریولیتی و داسیتی از گسترش قابل توجهی نسبت به گدازه‌های ریولیتی و داسیتی برخوردار هستند. این واحدهای سنگی به صورت میان لایه‌هایی در سری ریزو (به‌ویژه در بخش‌های بالایی این سری) و نیز به صورت لایه‌های منفرد و یا دم‌های ریولیتی و داسیتی در مرز متاسوماتیت‌ها با گدازه‌های بازالتی تا بازالت آندزیتی، و دولومیت و آهک‌های دولومیتی قرار دارند (شکل‌های ۲-۱۷ و ۲-۱۹). جهت مطالعات پتروگرافی نمونه‌هایی با شماره سریال‌های (BG-T-13) تا (BG-T-15) از سنگ‌های توفی با ترکیب ریولیتی تا داسیتی انتخاب شده است. بر اساس مطالعات سنگ‌نگاری توف‌های داسیتی عموماً از فنوکریست‌های پلاژیوکلاز، کوارتز، اورتوکلاز، کانی‌های مافیک (هورنبلند و بیوتیت) و یا سانیدین به همراه رگه‌های آهن و کلسیت، و توف‌های ریولیتی عمدتاً از فنوکریست‌های پلاژیوکلاز، و کوارتز ترکیب یافته است.



شکل ۲-۱۹. توف داسیتی که در مرز متاسوماتیت‌ها و دولومیت و آهک دولومیتی قرار دارد (نگاه به سمت شمال).

### واحد دولومیت و آهک دولومیتی:

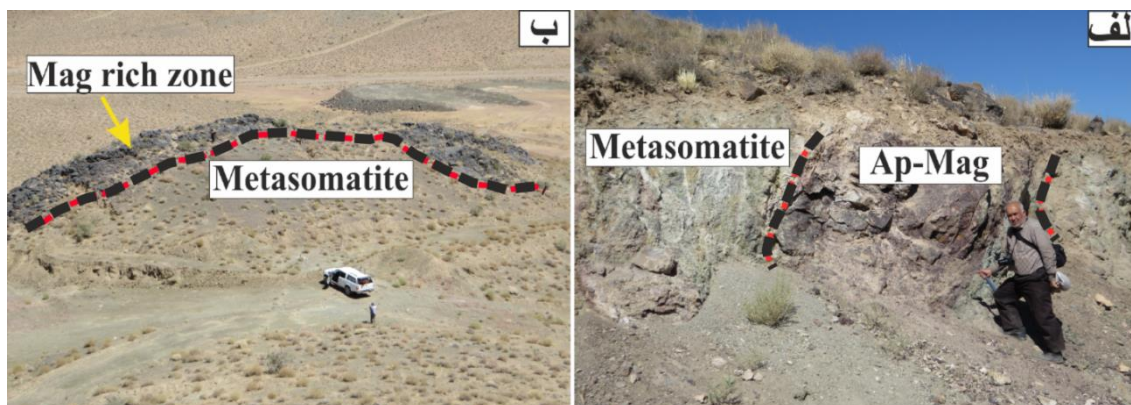
این واحد سنگی از بخش‌های فراگیر در منطقه گزستان می‌باشد که در قسمت‌های شمالی و جنوب غربی منطقه مشاهده می‌شوند. این واحد سنگی هم به صورت میان لایه در بخش‌های پایینی سری ریزو و نیز به صورت لایه‌های ضخیم در مرز گسلی با متاسوماتیت‌ها وجود دارند. دولومیت‌ها در نتیجه فرایندهای دگرگونی و متاسوماتیکی تبلور مجدد پیدا کردند و حالت مرمری نشان می‌دهند. به لحاظ شواهد صحرایی و نمونه دستی رنگ این واحد زرد تا قهوه‌ای روشن بوده و دارای بافت دانه متوسط هستند (شکل‌های ۲-۱۸، ۲-۱۹، و ۲-۲۰).



شکل ۲-۲۰: مرز گسلی میان متاسوماتیت‌ها با دولومیت و آهک‌های دولومیتی (نگاه به سمت غرب).

### کانسنگ‌های مگنتیت و آپاتیت گزستان:

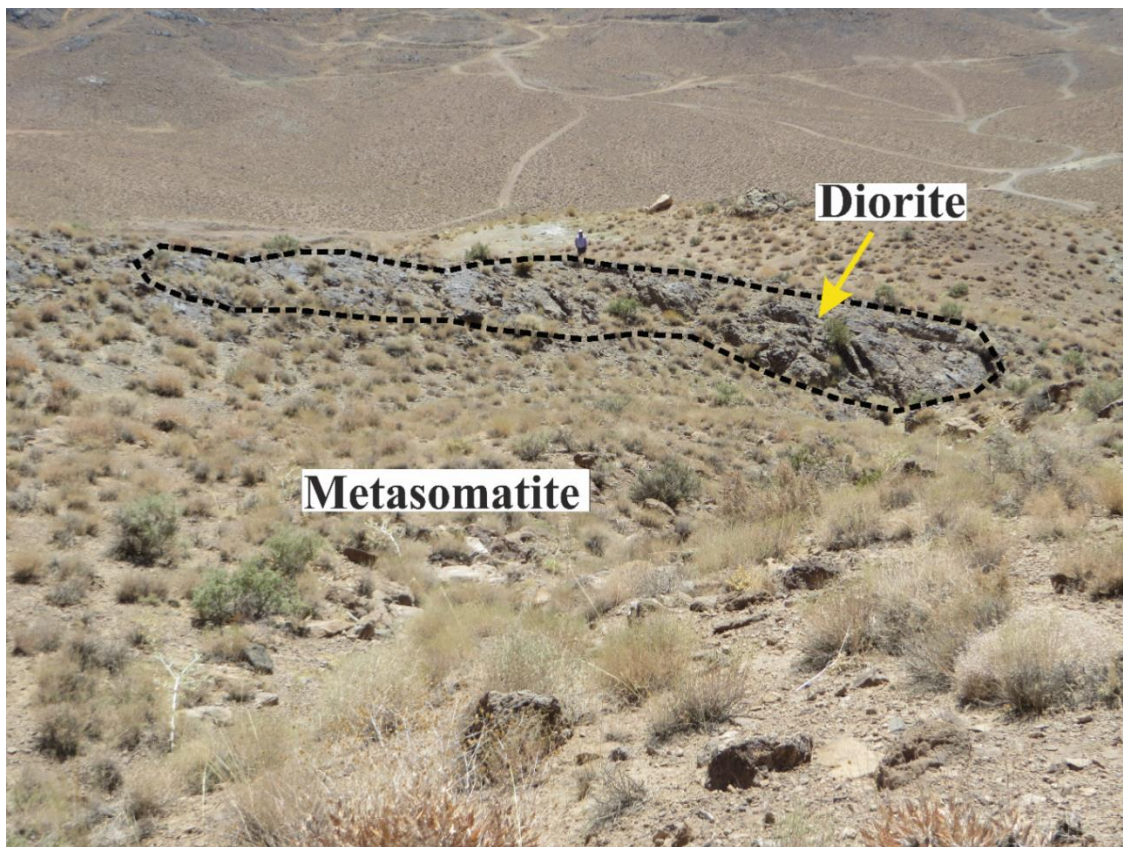
در منطقه گزستان بخش‌های غنی از مگنتیت، غنی از آپاتیت و غنی از مگنتیت-آپاتیت دیده می‌شود. کانه‌زایی در منطقه گزستان به شکل‌های چینه‌سان، توده‌ای، رگه-رگچه‌ای، استوک‌ورک، برشی و انتشاری در سنگ‌های میزبان متاسوماتیتی رخ داده است (شکل ۲-۲۱ الف، ب)، که در فصل کانه‌زایی به تفصیل در این ارتباط بحث می‌گردد.



شکل ۲-۲۱: الف) کانه‌زایی توده‌ای مگنتیت-آپاتیت در متاسوماتیت‌ها (نگاه به سمت جنوب)، و ب) کانسنگ توده‌ای مگنتیت-آپاتیت در متاسوماتیت‌ها (نگاه به سمت شمال).

### ۲-۳-۳-۲- سنگ‌های نفوذی منطقه معدنی گزستان

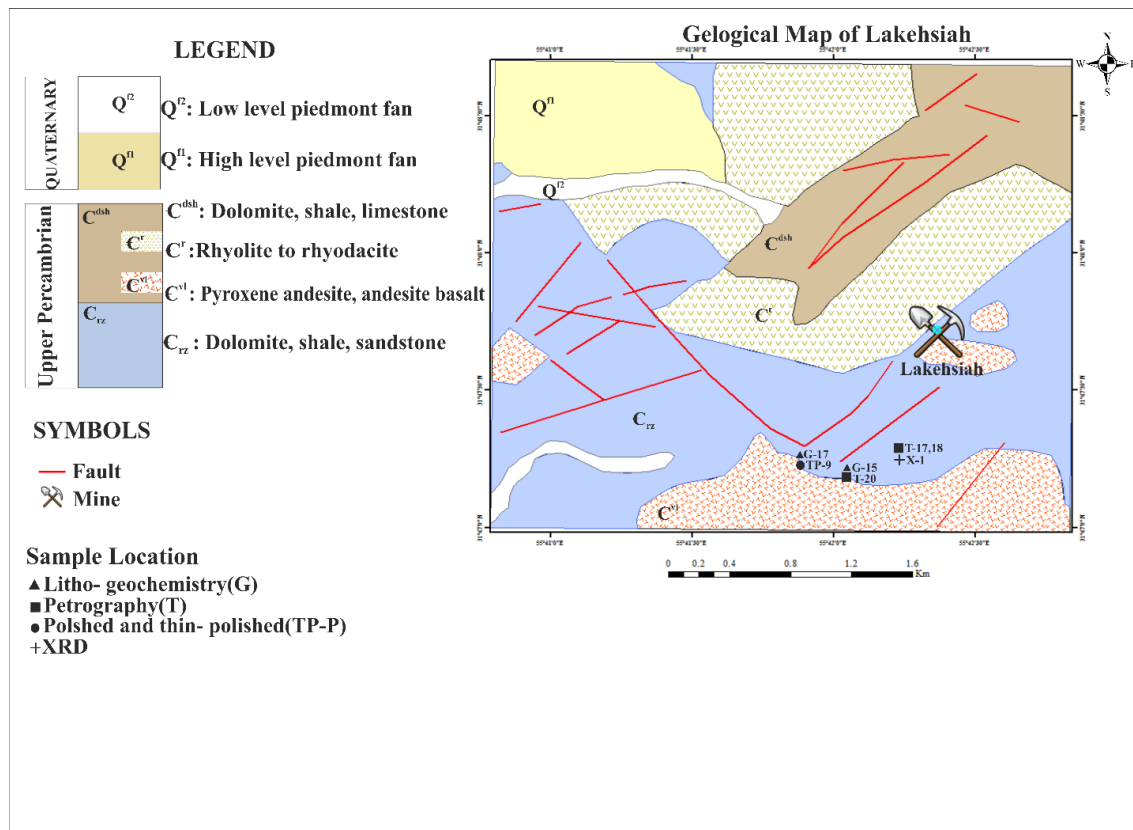
بر پایه مشاهدات صحرایی سنگ‌های نفوذی به صورت استوک و دایک‌های کوچک گرانیت، دیوریت، گابرو و دیاباز در داخل متاسوماتیت‌ها در منطقه معدنی گزستان وجود دارند. در این منطقه، سنگ‌های گرانیت، گابرو و دیاباز رخنمون خیلی جزئی دارند. دیوریت یکی دیگر از سنگ‌های نفوذی در منطقه گزستان است، که در داخل متاسوماتیت‌ها (به‌ویژه شیل‌های توفی دگرسان شده) تزریق شده است (شکل ۲-۲۲). بر اساس مطالعات سنگ‌نگاری، دیوریت‌های منطقه عموماً از پلاژیوکلاز و کانی‌های مافیک (اغلب هورنبلند ولی برخی از مواقع اوژیت یا بیوتیت)، و مگنتیت ترکیب یافته است و دارای بافت پورفیری هستند. در نمونه دستی رنگ ظاهری دیوریت‌های منطقه خاکستری تا سبز خاکستری است. نمونه‌ای با شماره سریال (BG-T-16) و مختصات جغرافیایی (X=401501, Y=3503864) از دیوریت‌ها انتخاب شده است.



شکل ۲-۲۲: رخنمون توده دیوریتی در متاسوماتیت‌های منطقه گزستان (نگاه به سمت جنوب- جنوب‌شرق).

## ۲-۳-۴- زمین‌شناسی منطقه معدنی لکه‌سیاه

بر اساس پیمایش‌های صحرایی و اطلاعات اطلاعات نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی (Soheili and Mahdavi, 1991) واحدهای سنگ‌شناسی که در منطقه لکه سیاه رخمون دارند به صورت زیر می‌باشد.



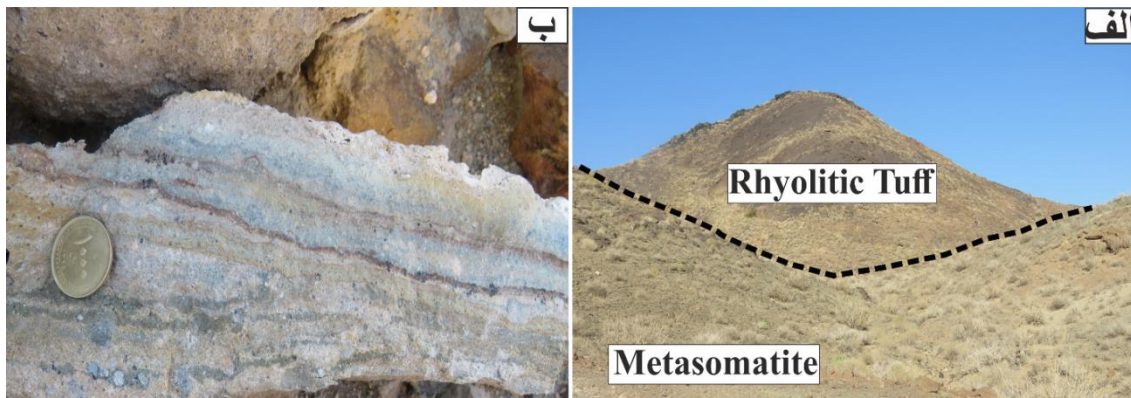
شکل ۲-۲۳: نقشه زمین‌شناسی منطقه معدنی لکه‌سیاه با تغییر از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی (Soheili and Mahdavi, 1991).

## ۲-۳-۴-۱- سازندهای زمین‌شناسی پرکامبرین بالایی - کامبرین زیرین (سری ریزو)

سری ریزو در منطقه معدنی لکه‌سیاه تناوبی از دولومیت، سنگ‌آهک، ماسه سنگ، شیل، توف ریولیتی، گدازه‌های بازلتی، متاسوماتیت، و کانه‌زایی‌های مگنتیت و آپاتیت را شامل می‌گردد. دولومیت و آهک دولومیتی در منطقه لکه‌سیاه گره‌ک‌ها و نوارهایی از چرت را دارا است. ضخامت لایه‌های دولومیتی از چند سانی‌متر تا چندین متر متغیر است و در نتیجه دگرگونی تبلور مجدد پیدا کرده و مرمی شده‌اند. سنگ‌های دولومیتی میان‌لایه‌هایی از ماسه سنگ، ماسه سنگ توفی، شیل، و گاه‌ها سنگ‌های آتشفشانی را دارند، و بیشتر بخش تحتانی سری ریزو را در بر می‌گیرند. این توالی در تماس با

توده‌های نفوذی دچار متاسوماتیسم شدید شده‌اند (شکل ۲-۲۵ الف و ب). نمونه‌های (BL-T-24) و (BL-TP-10) به ترتیب از دولومیت و ماسه‌سنگ‌های این منطقه انتخاب شده‌اند، سنگ‌های آتشفشانی که در منطقه لکه‌سیاه دیده می‌شود شامل گدازه‌های بازالتی تا بازالت آندزیتی و توف‌های ریولیتی است، که بیشتر بخش‌های بالایی سری ریزو را تشکیل می‌دهند (شکل ۲-۲۴ الف). در توالی توف و گدازه‌های آتشفشانی لایه‌های نازکی از آهک‌های خاکستری تیره دارای تبلور مجدد، و لامینه‌هایی از اکسیدهای آهن (مگنتیت، و هماتیت) به چشم می‌خورد (شکل ۲-۲۴ ب). نمونه (BL-T-19) از این محل برداشت و مطالعه شده است.

در منطقه لکه‌سیاه، کانه‌زایی به صورت بخش‌های غنی از مگنتیت، و مگنتیت هماتیتی شده است، که در قسمت‌هایی با آپاتیت همراهی می‌شوند. کانه‌زایی غالباً به شکل توده‌ای است، و بندرت رگه-رگچه‌ای، استوک‌ورک، برشی و انتشاری نیز در سنگ‌های میزبان متاسوماتیتی رخ داده است.



شکل ۲-۲۴: الف) توف‌های ریولیتی تشکیل شده به همراه سنگ‌های متاسوماتیتی در بخش‌های بالایی سری ریزو. ب) آهک‌های خاکستری نواری در توالی گدازه‌های آتشفشانی به همراه اکسیدهای آهن

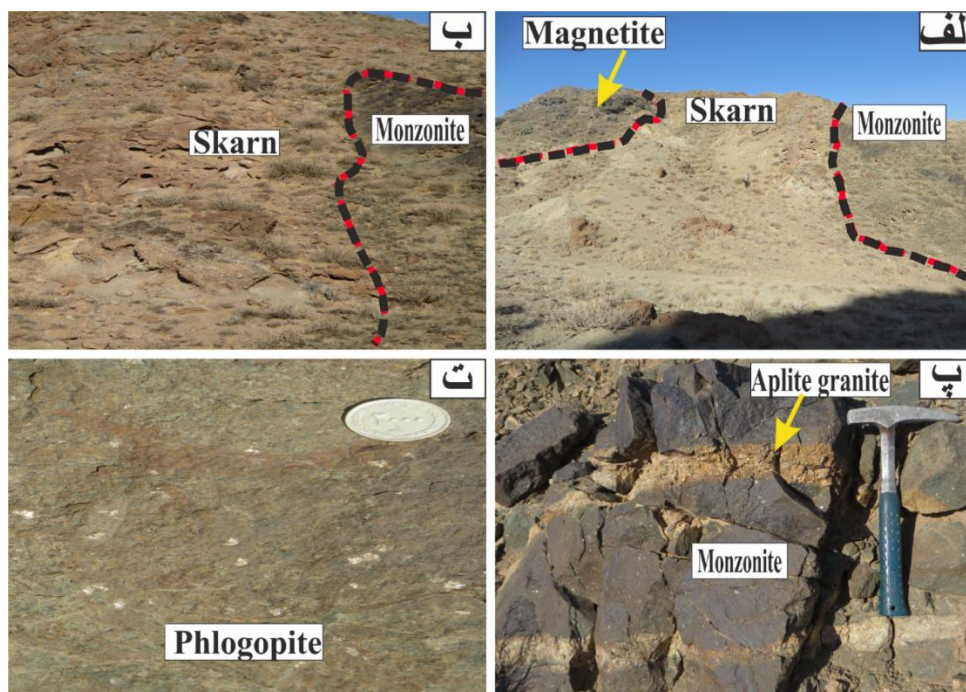
### ۲-۳-۴-۲- سنگ‌های نفوذی منطقه معدنی لکه‌سیاه

توالی سنگ‌شناسی سری ریزو در منطقه معدنی لکه‌سیاه به وسیله سنگ‌های نفوذی با ترکیب دیوریت‌های غنی از بیوتیت (ترالیت)، اسکارن، سینیت و گرانیت قطع شده‌اند. در ادامه، هر یک از این سنگ‌ها توصیف می‌گردد:

## مونزونیت:

پیمایش‌های صحرایی در منطقه لکه‌سیاه، سنگ آذرین منحصر بفردی را نشان داد. بر اساس مطالعات سنگ‌نگاری، آن‌ها از کانی‌های پلاژیوکلاز، پیروکسن، بیوتیت، و به مقدار جزئی هورنبلند و اپیدوت ترکیب یافته است. این سنگ‌ها در تماس خود با توالی کربناتی-آواری بخش پایینی سری ریزو سبب متاسوماتیسم سنگ‌های دولومیتی، ماسه سنگ، و ماسه سنگ توفی و تشکیل سنگ‌های اسکارنی و آهن‌های با منشاء اسکارنی شده اند (شکل‌های ۲-۲۵ الف تا ت). نمونه‌های (BL-T-17, BL-T-18, ) (شکل ۲-۲۵ پ). اسکارن: اسکارن سنگ دگرگونی به رنگ‌های سبز یا قرمز و گاهی به رنگ خاکستری، سیاه، قهوه‌ای یا سفید، معمولاً توسط متاسوماتیسم شیمیایی سنگها در طی فرایند دگرگونی و در محل تماس سنگ‌های نفوذی ماگمایی مانند گرانیت‌ها با سنگ‌های غنی از کربنات مانند کلسیت و دولومیت تشکیل می‌شود. بر اساس شواهد صحرایی این سنگ‌ها در منطقه اسفوردی به صورت محلی و در تماس با سینیت‌ها و در منطقه لکه‌سیاه در مجاورت ترالیت و بخش‌های غنی از مگنتیت دیده می‌شود. بررسی‌های صحرایی و مطالعات پتروگرافی صورت گرفته در معدن چغارت نیز بیانگر وجود این سنگ‌های دگرگونی است که در فصل بعد در مورد ویژگی‌های سنگ‌شناسی آن‌ها به تفصیل می‌پردازیم.





شکل ۲-۲۵: الف و ب) تشکیل سنگ‌های اسکارنی و آهن اسکارنی در تماس مونزونیت با دولومیت، ماسه‌سنگ، و ماسه‌سنگ‌های توفی سری ریز. (نگاه به سمت جنوب - جنوب شرق)، پ) رگه‌های آپلیت گرانیت در مونزونیت، و ت) درشت‌بلورهای فلوگوپیت در مونزونیت.

### سینیت و مونزوسینیت:

سینیت از سنگ‌های آذرین نفوذی مهم در منطقه فلززایی بافق می‌باشد، در توالی سنگی سری ریزو نفوذ کرده است، و در مقایسه با مناطق معدنی اسفوردی و چگارت از رخنمون سطحی کمتری برخوردار است. به لحاظ شکل ظاهری سینیت‌ها به رنگ کرم تا صورتی و با دانه بندی متوسط تا درشت دیده می‌شود، و از پلاژیوکلاز، اورتوز، هورنبلند در یک بافت همسان‌دانه تشکیل شده‌اند. نمونه‌ی (BL-T-22) از سنگ سینیتی در محل معدنکاری آهن لکه‌سیاه انتخاب شده است. لازم به ذکر است که به دلیل فعالیت‌های استخراج معدنی رخنمون برجایی از سینیت مشاهده نشد، ولی در باطله‌های معدنی و در متاسوماتیت‌ها آثاری از سینیت مشاهده می‌شود (شکل ۲-۲۶ ب). نمونه مونزوسینیت در مجاورت توده غنی از مگنتیت و از باطله‌های معدنی با شماره سریال (BL-T-23) با مختصات مکانی (X=378180 , Y=3517068) انتخاب شده است که در فصل‌های بعد در مورد ویژگی‌های کانی‌شناسی و ژئوشیمی آن صحبت خواهیم کرد (شکل ۲-۲۶ الف).



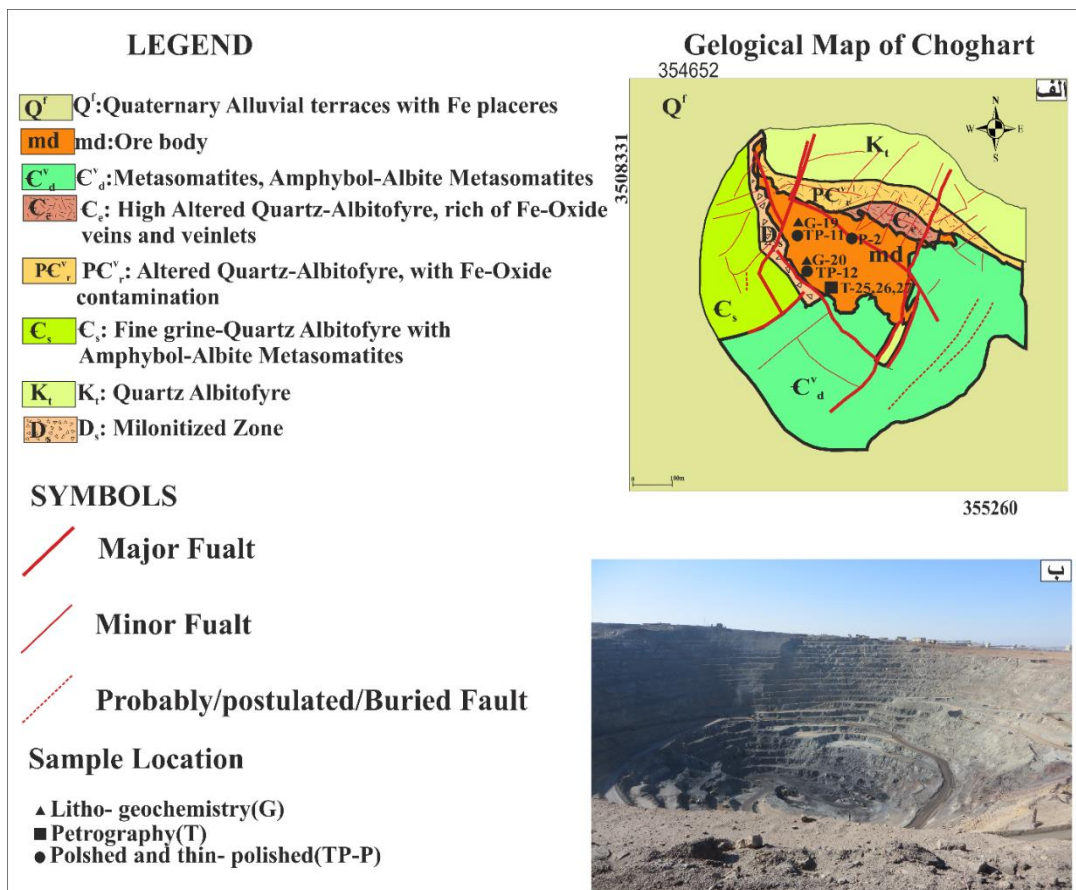
شکل ۲-۲۶: الف) توده‌ای از مگنتیت که در تماس با مونزوسینیت قرار دارد (نگاه به سمت شمال). ب) تصویری از نمونه سینیت که در منطقه لکه‌سیاه دیده می‌شود.

### گرانیت:

گرانیت به صورت دایک و توده‌های کوچک آپلیتی در سنگ‌های سری ریزو (به ویژه درون سنگ‌های مونزونیت) در منطقه لکه‌سیاه مشاهده می‌گردد. در نمونه‌های دستی این سنگ به رنگ سفید تا کرم دیده می‌شوند. بر پایه مطالعات سنگ‌نگاری گرانیت‌ها از کوارتز، آلکالی فلدسپار و پلاژیوکلاز تشکیل یافته‌اند و محصول نهایی تفریق ماگماهای مافیکی می‌باشند و با سنگ‌های گابرویی، دیوریتی و سینیتی منطقه فلززایی بافق هم‌ماگما می‌باشند (شکل ۲-۲۵ پ).

### ۲-۳-۵- زمین‌شناسی منطقه معدنی چغارت

بر پایه مشاهدات صحرایی، کانسار آهن چغارت، در مجموعه‌ای از گدازه‌های آتشفشانی فلسیک تا حدواسط همراه با لایه‌های رسوبی کربناتی-آواری با سن پرکامبرین بالایی-کامبرین زیرین که مورد نفوذ سنگ‌های گرانیتی، سینیتی، دیوریتی، و گابروئی قرار گرفته‌اند، تشکیل شده‌است. کانه‌زایی و سنگ‌های میزبان آن‌ها به وسیله دایک‌های دیابازی قطع شده‌اند. کل مجموعه به وسیله سازندهای کواترنری و رسوبات عهد حاضر احاطه شده‌اند (شکل ۲-۲۷). دلیران (Daliran, 2002) و استوش و همکاران (Stosch et al., 2011)، معتقد هستند که کانه‌زایی آهن چغارت در درون توف‌های ریولیتی تا ریوداسیتی و سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی رخ داده است. سنگ‌های نفوذی سینیتی، گابرویی، دیوریتی و گرانیتی به وسیله سنگ‌های آلکالی‌ریولیتی احاطه شده‌اند.



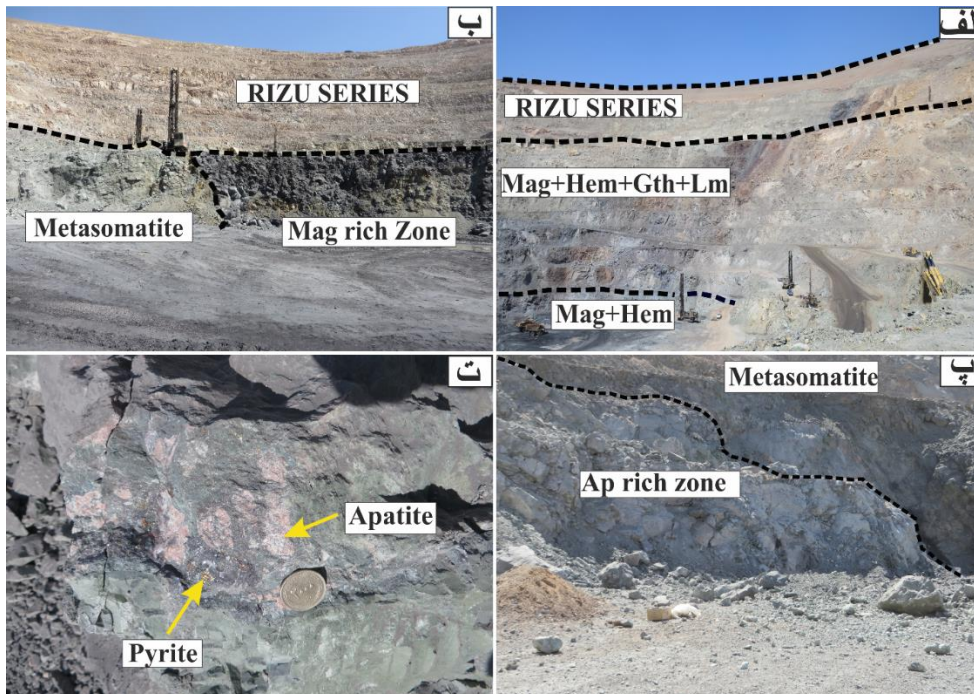
شکل ۲-۲۷. الف) نقشه زمین‌شناسی معدن چغارت با تغییرات از (Moore and Modabberi, 2003). ب) نمایی از معدن آهن چغارت در نیمه دوم مرداد ۱۳۹۶ (نگاه به سمت جنوب).

### ۳-۵-۱- واحدهای سنگی سری ریزو

مشاهدات صحرایی از معدن چغارت بیانگر این است که واحدهای سنگی سری ریزو که در این منطقه رخنمون دارند شامل توف ریولیتی تا ریوداسیتی، دولومیت، و ماسه سنگ است، که در این میان توف‌های ریولیتی تا ریوداسیتی در مقایسه با بخش‌های رسوبی از گسترش زیادی برخوردار هستند. توالی سری ریزو در بخش‌هایی به شدت دچار دگرسانی و دگرگونی شده و به سنگ‌های متاسوماتیت تبدیل شده‌اند. متاسوماتیت‌ها بخش عمده معدن چغارت را در برمی‌گیرند، و به عنوان سنگ میزبان کانه‌زایی مگنتیت، مگنتیت-آپاتیت، آپاتیت و سنگ‌های نفوذی گرانیت، سینیت، سینودیوریت، دیوریت، گابرو، و دیاباز هستند. در منطقه‌ی معدنی چغارت نیز همانند دیگر مناطق فلززایی بافق میان کانه‌زایی آهن-آپاتیت با متاسوماتیت‌ها ارتباط مکانی بسیار نزدیکی وجود دارد. اصلی‌ترین واحد کانه‌زایی در این منطقه مگنتیت است که در قسمت‌هایی با آپاتیت همراهی می‌شود (شکل ۲-۲۸ ب).

بخش‌های غنی از آپاتیت نیز در کانسار وجود دارد (شکل ۲-۲۸ پ). در قسمت‌هایی از کانسار پیریت

و کالکوپیریت نیز در حد مقادیر جزئی مگنتیت و آپاتیت را همراهی می‌نمایند (شکل ۲-۲۸ ت)



شکل ۲-۲۸ الف: کانه‌زایی آهن چغارت در توالی‌های سنگی سری ریزو (عمدتاً توف‌های ریولیتی تا ریوداسیتی، و متاسوماتیت‌ها) در امتداد ساختار گسلی با روند شمال غرب- جنوب شرق (نگاه به سمت غرب-شمال غرب). ب) بخش-های غنی از مگنتیت کانسار چغارت که در تماس با متاسوماتیت‌ها در سری آتشفشانی-رسوبی ریزو وجود دارد. پ) بخش‌های غنی از آپاتیت در معدن چغارت که در تماس با متاسوماتیت‌ها قرار گرفتند، ت) بلورهای شکل‌دار تا بی‌شکل آپاتیت در متاسوماتیت‌ها که با مگنتیت، کالکوپیریت و پیریت همراه هستند.

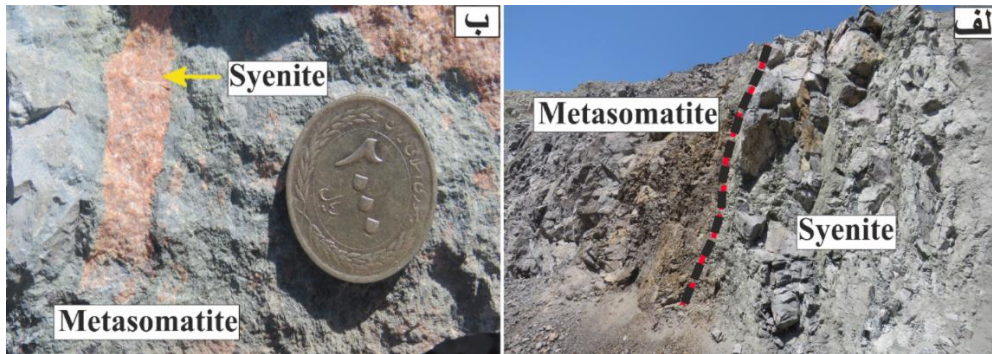
### ۲-۳-۵-۲- سنگ‌های نفوذی منطقه معدنی چغارت

توف‌های ریولیتی تا ریوداسیتی و متاسوماتیت‌ها، میزبان نفوذی‌های گرانیت، سینیت، سینودیوریت، دیوریت، گابرو، و دیاباز هستند. سنگ‌های نفوذی به صورت توده، آپوفیز و دایک نمود دارند. در معدن چغارت سنگ‌های گرانیت، گابرو، و دیاباز به ندرت وجود دارند، و بیشترین گسترش به ترتیب مربوط به سینیت و دیوریت است.

#### سینیت:

بر پایه شواهد صحرایی، اصلی‌ترین توده نفوذی در منطقه چغارت سینیت است. سینیت‌ها به صورت‌های توده‌های کوچک و دایک در توف‌های ریولیتی تا ریوداسیتی و متاسوماتیت‌ها رخمون دارند (شکل‌های ۲-۲۹ الف و ب). آن‌ها سنگ‌های آذرین درونی حدواسط دانه درشت تا دانه متوسطی

هستند که به طور عمده از آلکالی فلدسپار به همراه پلاژیوکلاز و آمفیبول تشکیل شده‌اند. نمونه‌ای با شماره سریال (BC-T-26) و مختصات جغرافیایی (X=355127, Y=3508020) از سینیت‌های چغارت برداشت شد.



شکل ۲-۲۹: الف) نفوذ توده سینیت در مجاورت متاسوماتیت‌های معدن چغارت (نگاه به سمت شمال)، ب) (آثاری از نفوذی‌های سینیتی در متاسوماتیت‌های معدن چغارت).

#### دیوریت:

سنگ آذرین نفوذی دیگری که در منطقه چغارت دیده می‌شوند، دیوریت است. دیوریت سنگ آذرین درونی حدواسط تمام بلورین دانه درشت تا دانه متوسط می‌باشد. بر اساس مطالعات سنگ‌نگاری دیوریت منطقه چغارت عموماً از پلاژیوکلاز و کانی‌های مافیک (هورنبلند) تشکیل شده‌است. شکل ظاهری و نمونه دستی دیوریت به رنگ خاکستری تا خاکستری متمایل به سبز است، و نمونه شماره (BC-T-28) از این سنگ‌ها برای سنگ‌نگاری انتخاب گردید.



فصل سوم

سنگ نگاری

### ۳-۱- مقدمه

سنگ‌نگاری بخشی از علم سنگ‌شناسی است، که با توجه به آن مسائلی از قبیل ترکیب کانی‌شناسی، روابط بافتی، نام سنگ و شواهد میکروسکوپی تحولات ماگمایی سنگ‌ها مورد مطالعه قرار می‌گیرند. در این گفتار به طور کلی ویژگی‌های کانی‌شناسی، ساختی و بافتی سنگ‌های منطقه بررسی می‌گردد. بدین منظور پس از بررسی‌های صحرایی تعداد ۳۳ نمونه جهت مطالعات سنگ‌نگاری از سنگ‌های رسوبی، آذرآواری، آذرین بیرونی و درونی، و متاسوماتیت‌ها برداشت شد و در کارگاه تهیه مقطع نازک دانشگاه صنعتی شاهرود مقاطع نازک و نازک - صیقلی از آن‌ها تهیه گردید و توسط میکروسکوپ پلاریزان مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به مشاهدات صحرایی و مطالعات سنگ‌نگاری سنگ‌های منطقه مورد مطالعه به شرح زیر تقسیم شده‌اند:

- سنگ‌های رسوبی (دولومیت، ماسه‌سنگ).

سنگ‌های آذرآواری: توف ریولیتی، توف داسیتی، توف ریوداسیتی.

- سنگ‌های آذرین: گدازه‌های آتشفشانی (بازالت، بازالت آندزیتی) و سنگ‌های نفوذی (مونزونیت، دیوریت، مونزوسینیت، سینیت، آپلیت گرانیت).

- متاسوماتیت‌ها

در ادامه به مطالعه و بررسی مشخصات میکروسکوپی این سنگ‌ها پرداخته می‌شود. علائم اختصاری مورد استفاده در این فصل مطابق با جدول ۳-۱ می‌باشد.



جدول ۳-۱: علائم اختصاری مورد استفاده در تصاویر شکل‌های این فصل (Whitney and Evans, 2010)

نام کانی	علامت اختصاری	نام کانی	علامت اختصاری
کلسیت	Cal	دولومیت	Dol
کوارتز	Qz	اپک	Opq
مگنتیت	Mag	آلکالی فلدسپات	Afs
اپیدوت	Ep	سریسیت	Ser
پلاژیوکلاز	Pl	پیروکسن	Px
بیوتیت	Bt	آپاتیت	Ap
اسفن	Spn	کلریت	Chl
هورنبلند	Hbl	آمفیبول	Amp
آنیت	Ann	گارنت	Grt
مسکویت	Ms	هماتیت	Hem
اکتینولیت	Act	ترمولیت	Tr

### ۳-۲- سنگ‌های رسوبی

سنگ‌های رسوبی غالب در منطقه مورد مطالعه شامل دولومیت و ماسه‌سنگ می‌باشد که بطور بین لایه‌ای با شیل، شیل توفی، توف‌های ریولیتی، ریوداسیتی، داسیتی و گدازه‌های بازالتی و بازالت آندزیتی مشاهده می‌شوند. این توالی رسوبی - آتشفشانی به سن نئوپروتوزوئیک پسین - کامبرین پیشین به صورت گسترده در منطقه رخنمون دارند. تعداد، شماره سریال، مختصات مکانی، کانی‌های سازنده و سنگ‌شناسی نمونه‌هایی که از سنگ‌های رسوبی منطقه فلزایی بافق برای مطالعات سنگ‌نگاری انتخاب شده‌اند، در جدول (۳-۲) آمده است. در ادامه، نتایج مطالعات سنگ‌نگاری نمونه‌های دولومیت و ماسه سنگ توصیف شده است.

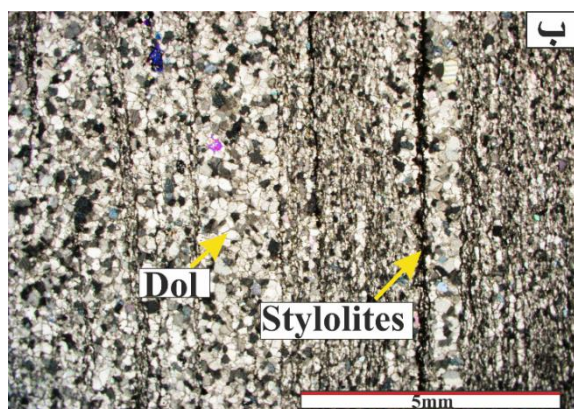
جدول ۳-۲: شماره، مختصات مکانی، کانی‌های سازنده و نام سنگ‌های نمونه‌های منتخب رسوبی.

نام سنگ	کانی‌های شناسایی شده	موقعیت جغرافیایی	شماره نمونه
متاگریوک	کوارتز، فلدسپات، کلریت، موسکوویت	X=3717342 Y=3520830	BE-T-2
دولومیت	دولومیت، اکسیدهای آهن و منگنز	X=370115 Y=3520137	BE-T-4
دولومیت	دولومیت، کلسیت به همراه کوارتز	X=378565 Y=3517530	BL-T-17
متادولومیت	دولومیت به همراه بلورهای کوارتز	X=378180 Y=3517068	BL-T-24
دولومیت	بلورهای دولومیتی که شکسته شده و فضای بین آن‌ها توسط اکسیدهای آهن پر شده است.	X=368664 Y=3518386	BE-T-32

### ۳-۲-۱- دولومیت

سنگ‌های کربناته (آهکی و دولومیتی) بسته به این‌که در چه اقلیمی قرار داشته‌باشند، در رنگ و درجه خلوص آن‌ها در سطح زمین و عمق تغییراتی به وجود می‌آید. اگر سنگ‌های کربناته در اقلیم کوهستانی و پر باران قرار گیرند، به دلیل ریزش نزولات جوی قسمتی از کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم آن‌ها شسته شده و عیار این عناصر در سطح کاسته می‌شود و به رنگ‌های زرد، نخودی تا اخراپی دیده می‌شوند. در صورتی که در این مناطق از سطح نمونه‌برداری شود، نمونه‌ها عیار واقعی را نشان نخواهند داد. در حالی‌که در اقلیم خشک، گرم و کم باران به دلیل حرارت بالا و کمبود ریزش نزولات جوی نمونه‌ها در سطح خلوص بیشتری و رنگ سفیدتر نسبت به عمق خواهند داشت (آدابی، ۱۳۸۳). دولومیت از سنگ‌های رسوبی فراگیر در منطقه فلززایی بافق می‌باشد و به همراه سایر واحدهای سنگی در سری ریزو مشاهده می‌گردد. دولومیت علاوه بر اینکه به صورت میان لایه در سری ریزو وجود دارد به صورت ضخیم لایه هم واحد سنگی مستقلی را تشکیل می‌دهد و این شکل از دولومیت در محدوده گزستان به وضوح دیده می‌شود. دولومیت‌ها در نتیجه دگرگونی تبلور مجدد پیدا نموده و به متادولومیت و یا دولومیت مرمری شده تبدیل شده‌اند. در این تحقیق تعداد ۴ نمونه در مناطق اسفوردی (BS-T-4,32) و لکه‌سیاه (BL-T-17,24) برای مطالعات سنگ‌نگاری انتخاب شده است. نمونه‌های دولومیتی برداشت شده از منطقه اسفوردی از واحدهایی گرفته شده که ضخامت آن‌ها از حد چند سانتی‌متر تا بیش از ۳ متر متغیر است و بعضاً عدسی و لایه‌هایی از اکسیدهای آهن و منگنز را در برمی‌گیرند. همچنین در این منطقه واحدهای دولومیتی با مرز مشخص با ماسه‌سنگ‌ها در توالی رسوبی مشاهده می‌شوند. شواهد صحرایی در منطقه لکه‌سیاه بیانگر این است که دولومیت‌ها و آهک‌های دولومیتی در تماس با سنگ‌های نفوذی دیوریتی دگرگون شده و به مرمر دولومیتی تبدیل شده‌اند و آثاری از کانه‌زایی آهن نیز در منطقه تماس این سنگ‌ها با دیوریت‌ها مشاهده می‌گردد. هر دو نمونه منطقه لکه سیاه از این محل برداشت شده‌اند. دولومیت یکی از اجزای اصلی تشکیل دهنده سنگ‌های کربناتی است. دولومیت معمولاً یک کانی ثانویه است که جانشین کانی‌های کلسیتی قبلی

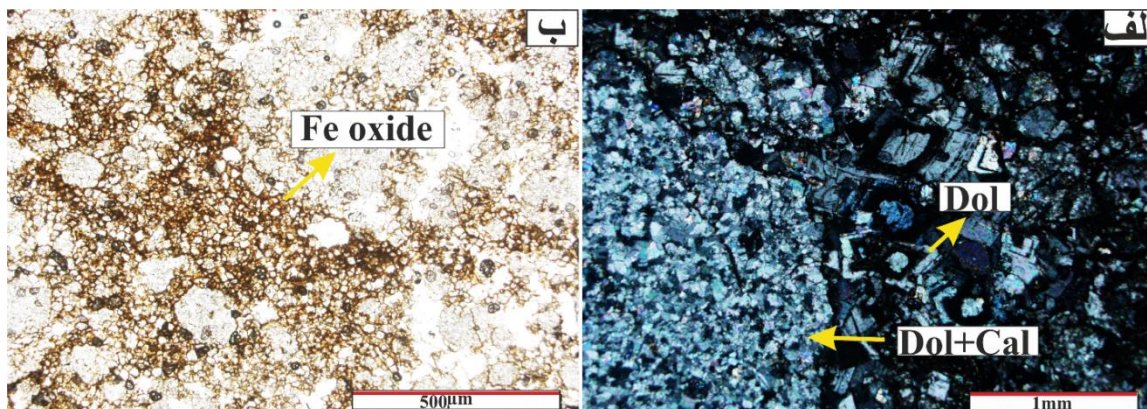
می‌شود. این کانی به صورت بلورهای خوش‌وجه لوزوجهی تشکیل می‌شود. دولومیت‌ها در نمونه دستی به رنگ‌های خاکستری مایل به کرم و سفید مایل به خاکستری یافت می‌شوند ولی برخی اوقات به رنگ‌های سفید، زرد، سبز و سیاه نیز دیده می‌شوند (شکل ۱-۳ الف). بر اساس مطالعات سنگ‌نگاری، بلوهای درشت دولومیت که متبلور شده‌اند با اشکال لوزوجهی که مقداری کوارتز و کلسیت در آنها وجود دارد به همراه بلورهای ریز دولومیت مشاهده می‌شوند. بر اساس طبقه‌بندی (Folk, 1962) اندازه بلورهای این نوع دولومیت بسیار متغیر بوده و از درشت بلور (۲۵۰ تا ۱۰۰۰ میکرون) تا خیلی درشت‌بلور (۱ تا ۴ میلی‌متر) و اغلب به اندازه فضای به اندازه فضای آزاد موجود بستگی دارد. از نظر طبقه‌بندی بافتی (Gregg and Sibley, 1984; Sibley and Gregg, 1987) در رده مسطح پرکننده حفرات قرار می‌گیرند همچنین این دولومیت‌ها در خود یک منطقه‌بندی درونی نشان می‌دهند که احتمالاً در نتیجه تفاوت ترکیب شیمیایی این بخش‌ها می‌باشد (شکل ۲-۳ الف). براساس مطالعات پتروگرافی دولومیت‌های منطقه لکه‌سیاه به‌صورت لایه‌ای که توسط باندهای استیلولیتی از هم‌دیگر جدا شده‌اند دیده می‌شوند (شکل ۱-۳ ب). استیلولیت‌ها ساخت‌های رسوبی ثانویه‌ای هستند که به‌صورت خطوط مضرسی در اغلب سنگ‌های آهکی دیده می‌شوند و در اثر تراکم شیمیایی و ایجاد انحلال فشاری به وجود می‌آیند (اهری پور، ۱۳۸۵). همچنین برپایه مطالعات کانی‌شناسی بلورهای دولومیت منطقه آغشتگی‌هایی به اکسید آهن از خود نشان می‌دهند (شکل ۲-۳ ب).



**الف**



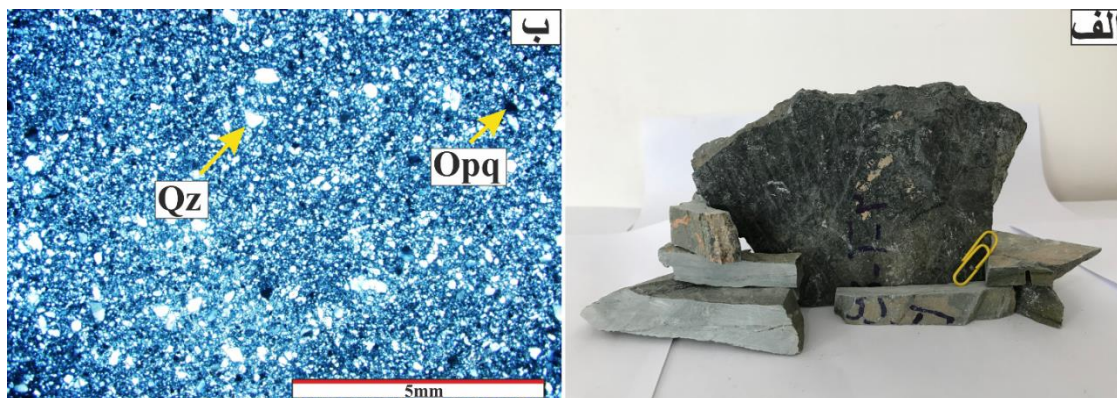
شکل ۱-۳ الف: تصویر نمونه دستی دولومیت، که از منطقه اسفوردی برداشت شده است، ب) تصویری از دولومیت‌های لایه‌ای که توسط نوارهای استیلولیتی جدا شده‌اند (XPL).



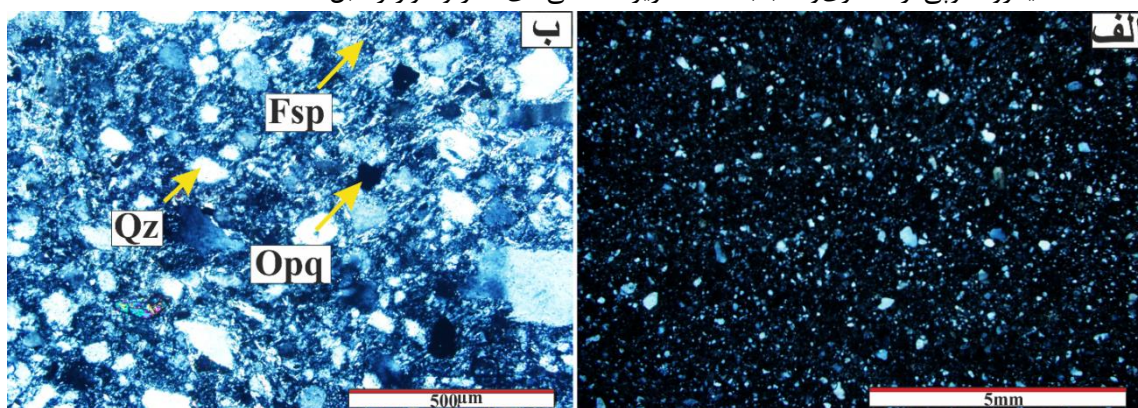
شکل ۳-۲: الف) تصویری از بلورهای لوزوجهی دولومیت که همراه با آن‌ها بلورهای ریز بلور دولومیت که نشان از دگرسانی دولومیت را دارند، دیده می‌شود (XPL)، ب) تصویری از آغستگی اکسیدهای آهن (PPL).

### ۳-۲-۲- ماسه‌سنگ

ماسه‌سنگ‌ها به صورت بین لایه‌ای با سایر واحدهای سنگی سری ریزو دیده می‌شوند. این واحد سنگی گسترش زیادی در منطقه فلززایی بافق دارد. از ماسه‌سنگ‌ها یک نمونه در منطقه اسفوردی جهت مطالعات سنگ‌نگاری برداشت شده است. بر اساس نتایج مطالعات سنگ‌نگاری نمونه ماسه‌سنگی منطقه اسفوردی گری‌وک نام‌گذاری می‌گردد. شکل ظاهری و نمونه دستی گری‌وک‌ها به رنگ خاکستری روشن دیده می‌شود (شکل ۳-۳ الف). گری‌وک‌ها ماسه سنگ‌های رس‌دار با بیش از ۱۵ درصد زمینه دانه ریز هستند. بر پایه مطالعات سنگ‌نگاری این نمونه، گری‌وک‌های منطقه در حد رخساره شیبست سبز دگرگون شده‌اند و به صورت پراکنده دارای دانه‌های کوارتز و فلدسپات هستند. همچنین بافت اسلیتی ضعیف در زمینه سنگ قابل مشاهده است (شکل ۳-۳ ب). در تصویری که با نور پلاریزان گرفته شده زمینه مقطع تقریباً تیره رنگ دیده می‌شود. قطعات موجود در این مقطع عمدتاً دانه‌های کوارتز تک بلور و چند بلور و درصد کمی خرده‌سنگ (ذرات بسیار دانه ریز کدر) هستند (شکل ۳-۴ الف). در (شکل ۳-۴ ب) رسوباتی با حدود ۱۵ درصد خمیره را نشان می‌دهد که دارای دانه‌های کوارتز و مقادیر فراوانی دانه‌های فلدسپات هستند.



شکل ۳-۳: الف) تصویری از نمونه دستی متاگری وک که از منطقه اسفوردی برداشت شده است، ب) تصویر میکروسکوپی از متاگری وک با بافت دانه ریز که کانی‌های کدر و کوارتز قابل مشاهده است (XPL).



شکل ۳-۴: الف) تصویری از حضور بلورهای کوارتز در یک زمینه دانه ریز از نمونه ماسه سنگ گری وک (XPL)، ب) تصویر میکروسکوپی از کانی‌های کوارتز، فلدسپات و کدر در زمینه از بافت خفیف اسلیتی (PPL).

### ۳-۳- سنگ‌های آذرآواری

مواد آذرآواری، در نتیجه فعالیت‌های آتش فشانی همراه با انفجار ماگمای گازدار، به وجود می‌آیند و در خشکی‌ها، دریا یا دریاچه رسوب می‌کنند. در منطقه مورد مطالعه حجم قابل توجهی از واحدها به این گروه از سنگ‌ها اختصاص یافته است که عمدتاً شامل توف با ترکیب ریولیتی، داسیتی و ریوداسیتی می‌باشند که به سن نئوپروتوزوئیک پسین - کامبرین پیشین در منطقه گسترده شده‌اند. در منطقه فلززایی بافق سنگ‌های آذرآواری به همراه دولومیت، ماسه سنگ، شیل توفی و متاسوماتیت‌ها، میزبان کانه‌زایی‌های آهن و آپاتیت هستند. سنگ‌های آذرآواری در محدوده‌های معدنی چغارت، اسفوردی، لکه‌سیاه و گزستان رخنمون دارند و نمونه‌هایی از این سنگ‌ها جهت مطالعات سنگ‌نگاری انتخاب شده است (جدول ۳-۳)، که در ادامه بطور جداگانه توصیف می‌گردد.

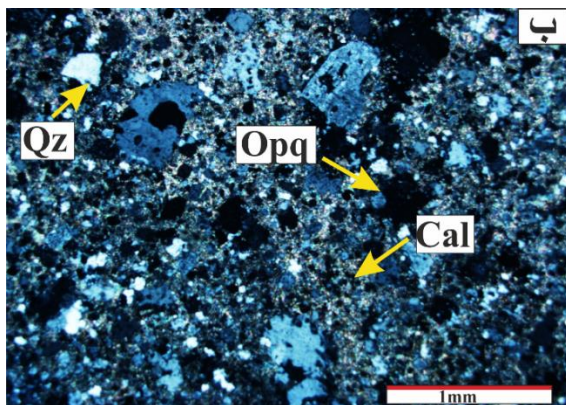
جدول ۳-۳: شماره، مختصات مکانی، کانی‌های سازنده و نام سنگ‌های منتخب از نمونه‌های آذرآواری منطقه بافق.

شماره نمونه	موقعیت جغرافیایی	کانی‌های شناسایی شده	نام سنگ
<b>BG-T-13</b>	X=401305 Y=35028046	کوارتز، کلسیت، موسکوویت، سربیسیت	توف ریولیتی
<b>BG-T-14</b>	X=421053 Y=352818	کوارتز، آپاتیت‌های برشی شده، رگه‌هایی از کلسیت	توف ریولیتی
<b>BL-T-19</b>	X=378548 Y=3517493	کوارتزهای خلیجی، فلدسپات، سانیدین، خمیره‌ای از کلسیت و سربیسیت	توف ریولیتی
<b>BE-T-31</b>	X=368664 Y=3518386	کوارتزهای خلیجی به همراه فلدسپات، اکسیدهای آهن و موسکوویت	توف ریولیتی
<b>BG-T-15</b>	X=402200 Y=3502849	کوارتزهای اولیه و ثانویه به همراه رگه‌هایی از اکسیدهای آهن و کلسیت	توف داسیتی
<b>BG-T-11</b>	X=401050 Y=3502914	کوارتز، رگه و رگچه‌های کلسیت، سربیسیت و کوارتز	توف ریوداسیتی
<b>BC-T-29</b>	X=354909 Y=3508212	کوارتز، رگه و رگچه‌های کلسیت	توف ریوداسیتی

### ۳-۳-۱- توف ریولیتی

بر پایه مشاهدات صحرایی توف‌های ریولیتی در منطقه اسفوردی به صورت بین لایه‌ای با سایر واحدهای سنگی سری ریزو مشاهده می‌شوند، که بعضاً توسط توده‌های سینیتی قطع شده‌اند. نمونه BS-T-31 از توف‌های ریولیتی منطقه اسفوردی انتخاب شده است. در منطقه گزستان این سنگ‌ها با متاسوماتیت‌ها دارای کنتاکت می‌باشند و نمونه‌های BG-T-13,14 از این سنگ‌ها برداشت شده‌اند. در منطقه لکه‌سیاه توف‌های ریولیتی با دولومیت و ماسه‌سنگ به صورت بین لایه‌ای قرار گرفته و بطور محلی توسط توده‌های دیوریتی و دیوریت غنی از بیوتیت قطع شده و درجاتی از دگرگونی را متحمل شده‌اند. نمونه BL-T-19 از این واحد سنگی گرفته شده است. در منطقه بافق، توف‌های ریولیتی در نمونه دستی به رنگ کرم تا خاکستری دیده می‌شوند (شکل ۳-۵ الف). در مقاطع میکروسکوپی به میزان فراوان حاوی کوارتز هستند که بعضاً به صورت خلیجی شکل حضور دارند. کانی‌های کدر شامل

اکسیدهای آهن در فضاهای خالی سنگ هستند. کانی‌های ثانویه کلسیت و سربیسیت به صورت رگه‌ای و درجهت‌های مختلف به شکل قطع‌شدگی توف ریولیتی دیده می‌شوند. بر اساس مطالعات میکروسکوپی اندازه ذرات تشکیل دهنده این توف‌ها کمتر از ۲ میلی‌متر می‌باشد. مولر و همکاران (Müller et al., 1981) معتقد هستند که ذرات سخت شده با قطر بین ۱/۶-۲ میلی‌متر به نام توف دانه درشت و ذرات ریزتر از ۱/۶ میلی‌متر به نام توف دانه‌ریز خوانده می‌شود (شکل ۳-۵ ب). همچنین آپاتیت از کانی‌های فرعی این سنگ‌ها است و بیشتر به صورت پرشدگی رگه و رگچه‌ها و فضای بین قطعات برش مشاهده می‌گردد. کانی سانیدین در نمونه مقطع توف ریولیتی منطقه لکه سیاه نیز دیده می‌شود.

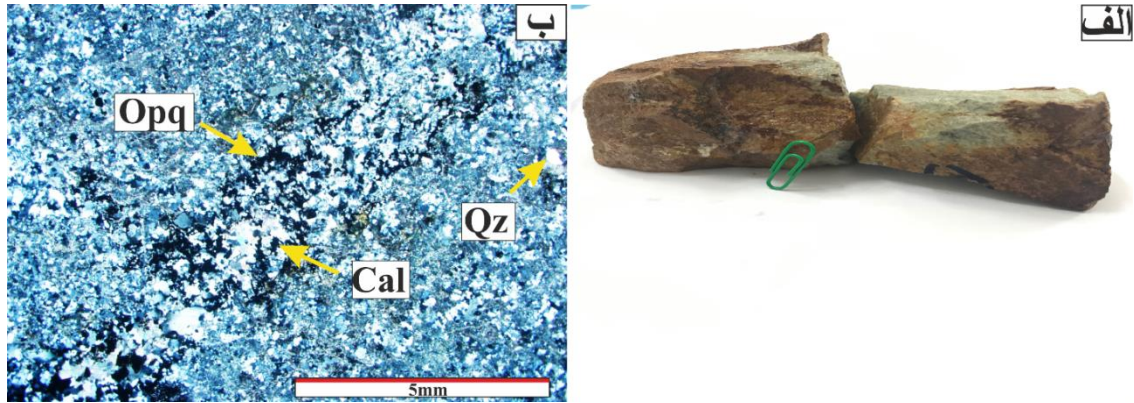


شکل ۳-۵: الف) تصویر از نمونه دستی توف ریولیتی که از منطقه گزستان برداشت شده است، ب) تصویر میکروسکوپی از توف ریولیتی که در آن کوارتزهای خلیجی به همراه کانی‌های کدر در زمینه‌ای دگرسان شده از کلسیت، سربیسیت و ... قابل مشاهده است (XPL).

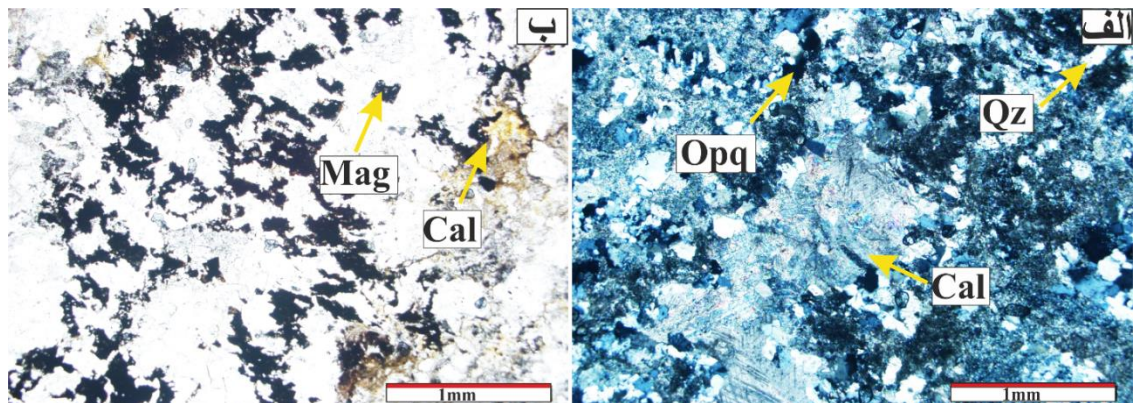
### ۳-۳-۲- توف داسیتی

توف‌های داسیتی از واحدهای سنگی فراگیر در منطقه فلززایی بافق می‌باشند و در هر ۴ منطقه معدنی دیده می‌شود. این سنگ‌ها با متاسوماتیت‌ها، توف‌های ریولیتی و دولومیت‌ها دارای کنتاکت می‌باشند. نمونه BG-T-15 از منطقه گزستان برداشت شده است. این سنگ به رنگ سفید تا کرم در نمونه دستی دیده می‌شوند (شکل ۳-۶ الف). در مقاطع میکروسکوپی حاوی مقادیر زیادی از کوارتز می‌باشد که رگه‌های کلسیت و کوارتز فضاهای خالی و شکستگی‌های سنگ را پر کرده و به صورت

قطع شدگی می باشد (شکل های ۳-۶ ب و ۳-۷ الف). کانی های کدر در این نمونه عمدتاً مگنتیت می باشد (شکل ۳-۷ ب).



شکل ۳-۶: الف) تصویری از نمونه دستی توف داسیتی که از منطقه گزستان برداشت شده است، ب) تصویر میکروسکوپی از توف داسیتی که شکستگی ها و حفرات در سنگ توسط کلسیت، کوارتز و مگنتیت پر شده است (XPL).



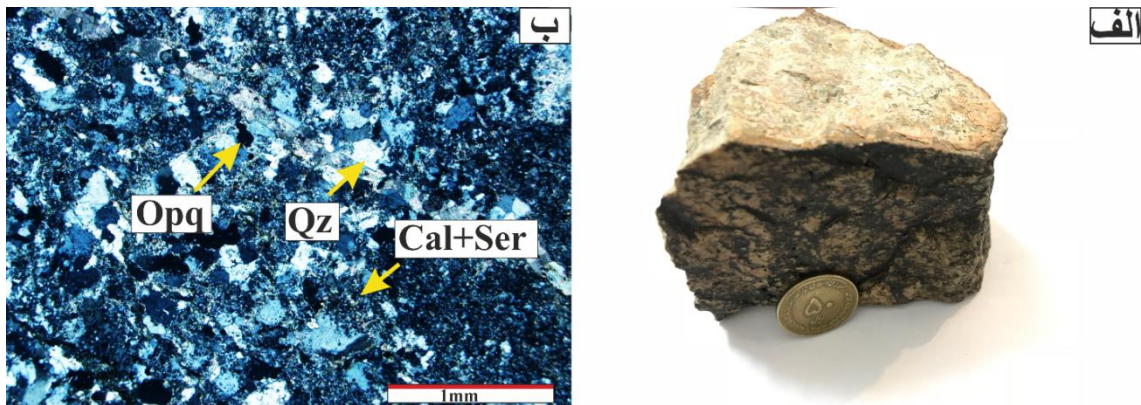
شکل ۳-۷: الف) تصویری از رگه های کلسیت، کوارتز به همراه کانی های کدر (XPL)، ب) اکسیدهای آهن در رگه های کوارتز و کلسیتی با سنگ میزبان توف داسیتی عمدتاً مگنتیت هستند (PPL)

### ۳-۳-۳ - توف ریوداسیتی

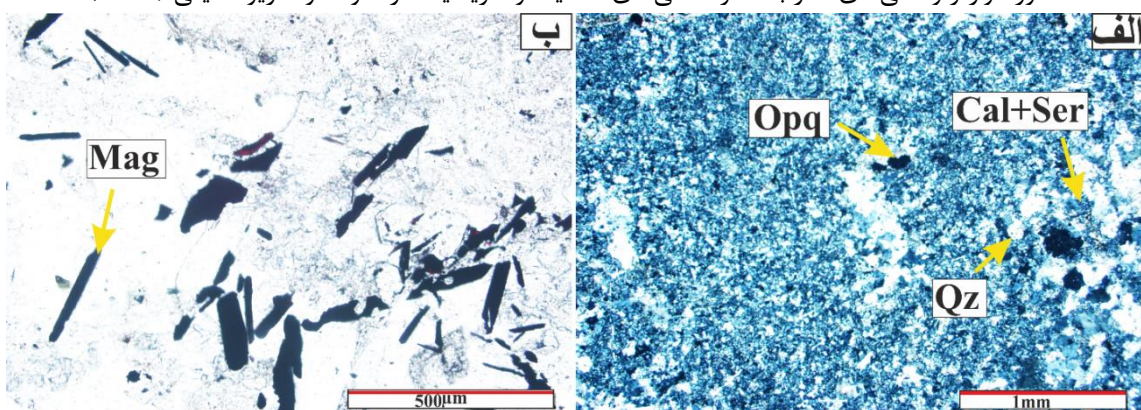
توف های ریوداسیتی نیز در منطقه فلزایی بافق به همراه سایر واحدهای سنگی در سری ریزو وجود دارند. در منطقه گزستان توف های ریوداسیتی به همراه توف های ریولیتی و بازالتی، متاسوماتیت ها و دولومیت ها، میزبان کانه زایی آهن و آپاتیت می باشند (BG-T-11). در منطقه چغارت نیز این واحد سنگی با گسترش زیاد وجود دارد (BC-T-29). این سنگ در نمونه دستی به رنگ قهوه ای تا خاکستری دیده می شود (شکل ۳-۸ الف). بر اساس مطالعات میکروسکوپی توف ریوداسیتی که شیشه زدایی شده (تبدیل شیشه به بلور) و مقادیر زیادی از کوارتز دارد و توسط یک سیال غنی از



کلسیم تحت تاثیر قرار گرفته و به شدت کلسیتی و سریسیتی شده است (شکل ۳-۸ ب). همچنین بافت ریزدانه در زمینه سنگ قابل مشاهده است (شکل ۳-۹ الف). کانی‌های کدر شامل تیغک‌های پراکنده مگنتیت است (شکل ۳-۹ ب).



شکل ۳-۸: الف) تصویری از نمونه دستی توف ریوداسیتی که از منطقه گزستان برداشت شده است، ب) تصویری از حضور کوارتز و کانی‌های کدر به همراه کانی‌های کلسیتی و سریسیت در نمونه توف ریوداسیتی (XPL).



شکل ۳-۹: الف) تصویری از بافت ریز دانه توف ریولیتی که شکستگی‌ها و فضاهای خالی توسط کانی‌های ثانویه کلسیت و سریسیت پر شده‌اند (XPL)، ب) تصویری از تیغک‌های مگنتیت در توف ریوداسیتی میزبان (PPL).

### ۳-۴- گدازه‌های آتشفشانی

گدازه‌های بازالتی و بازالت آندزیتی گسترش قابل ملاحظه‌ای در منطقه فلزایی بافق دارند، و در هر ۴ منطقه معدنی این گدازه‌ها وجود دارند. سنگ‌های گدازه‌ای بیشتر در کمربالای متاسوماتیت‌ها قرار می‌گیرند و دارای سن نئوپروتوزوئیک پسین- کامبرین پیشین هستند. بر پایه مشاهدات صحرایی این گدازه‌ها راهنمای اکتشافی مفیدی برای پی‌جویی کانسارهای آهن و آپاتیت در منطقه فلزایی بافق هستند. تعداد، شماره سریال، مختصات مکانی، کانی‌های سازنده و سنگ‌شناسی نمونه‌هایی که از

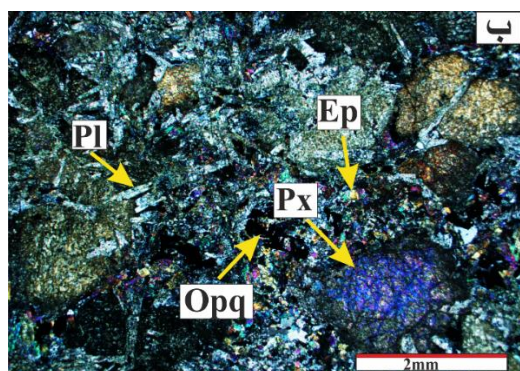
گدازه‌های آتشفشانی منطقه فلززایی بافق برای مطالعات سنگ‌نگاری انتخاب شده‌اند، در (جدول ۳-۴) داده شده است. در ادامه به توصیف سنگ‌نگاری این واحدهای سنگی پرداخته می‌شود.

جدول ۳-۴: شماره، مختصات مکانی، کانی‌های سازنده و نام نمونه‌های منتخب سنگ‌های گدازه‌ای محدوده معدنی بافق.

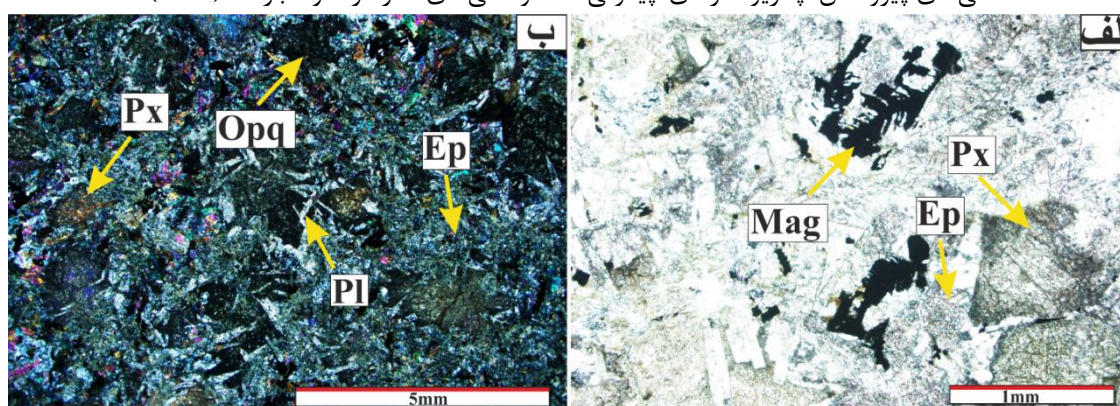
شماره نمونه	موقعیت جغرافیایی	کانی‌های شناسایی شده	نام سنگ
BE-T-5	X=370043 Y=3520124	پلاژیوکلاز، پیروکسن، اپیدوت، اسفن، کانی‌های کدر، دگرسانی اپیدوتی، بافت‌های اینترسرتال و افیتیکی.	بازالت
BG-T-12	X=401305 Y=35028046	پلاژیوکلازهای سریسیتی شده، به ندرت کانی‌های مافیک دگرسان شده، کانی‌های کدر، بافت پورفیری	بازالت آندزیتی

### ۳-۴-۱- بازالت

در منطقه اسفوردی گدازه‌های بازالتی در تماس با متاسوماتیت‌ها و کمربالای آن‌ها قرار دارند (BS-T-5). این سنگ‌ها در بخش‌های شمالی و شرقی منطقه اسفوردی رخنمون دارند. این سنگ‌ها در صحرا معمولاً سنگ‌های ناپیدا بلور، با ضریب رنگی ملانوکرات و دارای رنگ تیره و ساخت متراکم هستند (شکل ۳-۱۰ الف). در مقاطع میکروسکوپی پلاژیوکلاز عمده‌ترین کانی موجود در این سنگ‌ها است که اغلب به صورت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار دیده می‌شود و تحت تاثیر دگرسانی اپیدوتی قرار گرفته است. پیروکسن بعد از پلاژیوکلاز عمده‌ترین کانی موجود در این سنگ‌ها است که به دو صورت درشت بلور و ریز بلور در زمینه سنگ دیده می‌شود. رنگ پیروکسن‌ها مایل به بنفش روشن تا تیره است که حاکی از وجود مقداری عنصر تیتانیوم در ساختار آن‌ها است (شکل ۳-۱۰ ب). کانی‌های کدر که شامل مگنتیت می‌باشد اغلب به صورت ریز بلور در زمینه یا به صورت ادخال در پیروکسن‌ها حضور دارند (شکل ۳-۱۱ الف). بافت اینترسرتال از جمله بافتی است که در نمونه مشاهده می‌شود (شکل ۳-۱۱ ب).



شکل ۳-۱۰ الف) تصویری از نمونه دستی بازالت که از منطقه اسفوردی برداشت شده است، ب) تصویری از حضور کانی‌های پیروکسن، پلاژیوکلازهای اپیدوتی شده و کانی‌های کدر در نمونه بازالت (XPL).

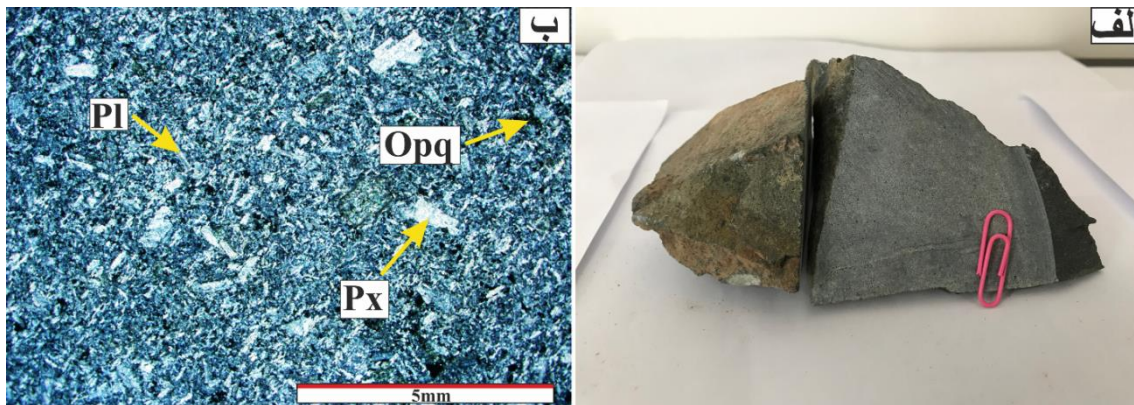


شکل ۳-۱۱ الف) تصویر میکروسکوپی از تیغک‌های مگنتیت به همراه بلورهای شکل‌دار پیروکسن و کانی ثانویه اپیدوت (PPL) ب) تصویری از بافت اینترسرتال در نمونه بالت از منطقه اسفوردی (XPL).

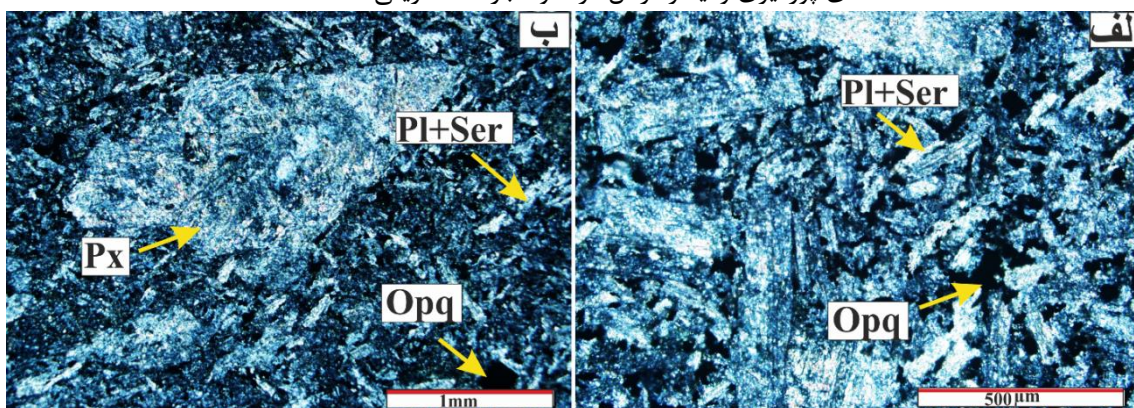
### ۳-۴-۲- بازالت آندزیتی

سنگ‌های آذرین بیرونی با ترکیب بازالت آندزیتی در منطقه بافق به صورت گسترده رخنمون دارند، و به عنوان یک کلید اکتشافی شناخته می‌شوند. در منطقه فلززایی بافق، این واحد سنگی در تماس با واحدهای تشکیل دهنده سری ریزو شامل توف‌های ریولیتی تا ریوداسیتی، دولومیت، ماسه‌سنگ و غیره حضور دارند. نمونه BG-T-12 از این واحد گدازه‌ای در منطقه گزستان انتخاب گردیده است. به لحاظ ظاهری و در نمونه دستی این سنگ به رنگ خاکستری تا تیره دیده می‌شود (شکل ۳-۱۲ الف). در مقاطع میکروسکوپی، پلاژیوکلاز فراوان‌ترین کانی در این سنگ‌ها است که هم به صورت فنوکریست و هم به صورت ریز بلور در خمیره سنگ حضور دارد. اکثر پلاژیوکلازها به صورت ماکل‌دار (پلی سنتتیک) هستند و در بیشتر نقاط تحت تاثیر دگرسانی سریسیتی قرار گرفته‌اند (شکل ۳-۱۳ الف). تک بلورهای کانی‌های مافیک که عمدتاً شامل آمفیبول (هورنبلند) هستند به صورت دگرسان

شده در زمینه حضور دارند. همچنین کانی‌های کدر به مقدار زیاد در زمینه سنگ دیده می‌شود (شکل ۳-۱۳ ب). مطالعات سنگ‌نگاری نشان می‌دهد که بافت‌های پورفیری و اینترسرتال از جمله بافت‌هایی هستند که در نمونه بازالت آندزیتی وجود دارد (شکل ۳-۱۲ ب).



شکل ۳-۱۲: الف) تصویر نمونه دستی از بازالت آندزیتی که از منطقه گزستان برداشت شده است، ب) تصویری از بافت‌های پورفیری و اینترسرتال در نمونه بازالت آندزیتی (XPL).



شکل ۳-۱۳: الف) تصویر میکروسکوپی از پلاژیوکلازها در نمونه بازالت آندزیتی که تحت تاثیر دگرسانی سریسیتی قرار گرفته‌اند (XPL)، ب) تصویری از حضور کانی‌های پلاژیوکلاز، پروکسن و کانی‌های اپاک (XPL).

### ۳-۵- سنگ‌های نفوذی

سنگ‌های نفوذی منطقه از مافیک به فلسیک شامل مونزونیت، دیوریت، مونزوسینیت، سینیت و آپلیت گرانیت می‌باشد که دارای سن نئوپروتوزوئیک پسین - کامبرین پیشین هستند. این نفوذی‌ها در واحدهای سری ریزو نفوذ کرده و علاوه بر کانه‌زایی‌های آهن - آپاتیت، در دگرگونی سنگ‌های میزبان نیز نقش داشته‌اند. تعداد، شماره سریال، مختصات مکانی، کانی‌های سازنده و سنگ‌شناسی نمونه‌هایی

که از سنگ‌های نفوذی منطقه فلززایی بافق برای مطالعات سنگ‌نگاری انتخاب شده‌اند، در (جدول ۳-۵) داده شده است.

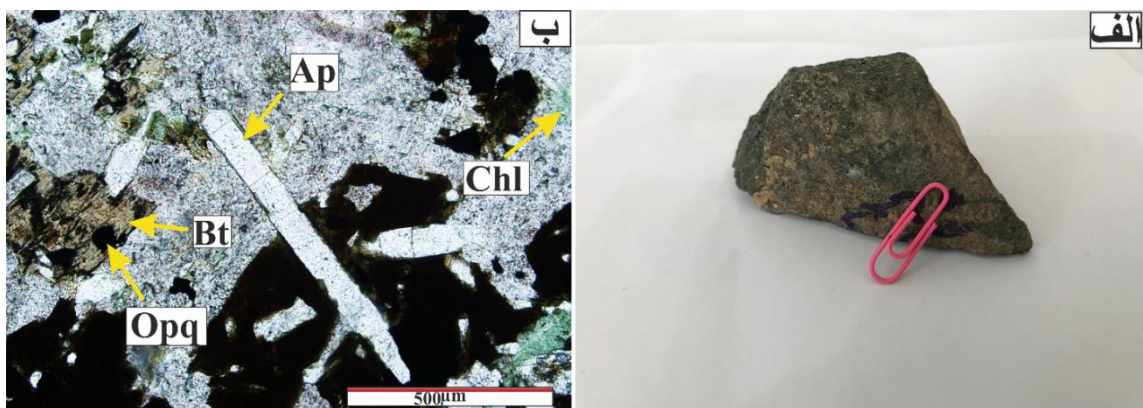
جدول ۳-۵: شماره، مختصات مکانی، کانی‌های سازنده و نام سنگ نمونه‌های منتخب سنگ‌های نفوذی.

شماره نمونه	موقعیت جغرافیایی	کانی‌های شناسایی شده	نام سنگ
BL-T-20	X=378548 Y=3517493	بیوتیت، هورنبلند، کلریت، پلاژیوکلاز، آپاتیت، سربیسیت، اسفن، کلسیت، اپیدوت	مونزونیت
BE-T-3	X=370150 Y=3520160	پلاژیوکلاز، هورنبلند، کلریت، اپیدوت، پیروکسن	دیوریت
BG-T-16	X=401501 Y=3503864	پلاژیوکلاز، اوژیت، کوارتز، سربیسیت، کلسیت	دیوریت
BC-T-28	X=355086 Y=3508288	کوارتز، کلسیت، پلاژیوکلاز، هورنبلند، گارنت	دیوریت
BE-T-10	X=371222 Y=3518338	بیوتیت، پیروکسن، آلکالی فلدسپات، آمفیبول، ارتوز، کلریت، اپیدوت، کلسیت، سربیسیت	مونزوسینیت
BL-T-23	X=378180 Y=3517068	ارتوز، آلکالی فلدسپات، آمفیبول، آپاتیت، کلریت، کلسیت، کوارتز	مونزوسینیت
BE-T-1	X=370982 Y=3520833	ارتوز، آلکالی فلدسپات، کلسیت، کلریت، هورنبلند، کانی‌های اپاک	سینیت
BL-T-22	X=378548 Y=3517493	آمفیبول، آلکالی فلدسپات، پلاژیوکلاز، اپیدوت، کلریت، کلسیت	سینیت
BC-T-26	X=355127 Y=3508020	اپیدوت، کلسیت، آلکالی فلدسپات، کلریت، سربیسیت	سینیت
BE-T-30	X=368591 Y=3518359	کوارتز، فلدسپات، کلسیت، موسکوویت، اکسیدهای آهن	آپلیت گرانیت

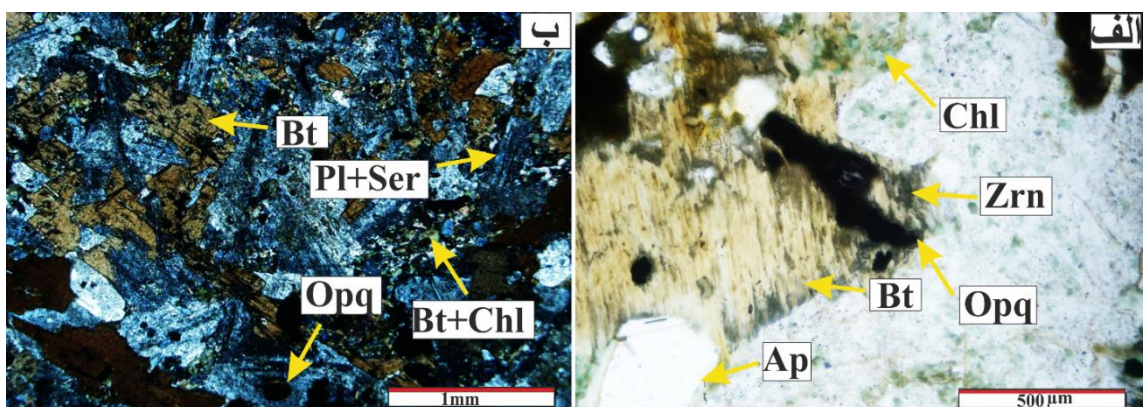
### ۳-۵-۱- مونزونیت

این سنگ‌ها در منطقه لکه‌سیاه و درون توالی رسوبی - آذرآواری (دولومیت، ماسه‌سنگ، توف) سری ریزو نفوذ کرده، و در تماس خود با این سنگ‌ها سبب اسکارن‌زایی محلی شده‌اند. این سنگ‌ها به نوبه خود توسط رگه و دایک‌های کوچکی از آپلیت گرانیت قطع شده‌اند. نمونه شماره BL-T-20 از این سنگ‌ها در منطقه لکه‌سیاه برداشت شده است. بر اساس مطالعات سنگ‌نگاری، این نمونه دیوریت

غنی از بیوتیت است این سنگ، در ظاهری دارای رنگ خاکستری تیره تا سبز تیره می‌باشد (شکل ۳-۱۴). بر اساس مطالعات سنگ‌نگاری، کانی‌های اصلی در این نمونه شامل پلاژیوکلاز، هورنبلند، بیوتیت‌های غنی از آهن و پیروکسن است که تحت تاثیر دگرسانی‌های سرسیتی و کلریتی قرار گرفته‌اند (شکل ۳-۱۵ ب). آپاتیت جز کانی‌های ثانویه‌ای است که به صورت بلورهای شکل‌دار دیده می‌شود (شکل‌های ۳-۱۴ ب و ۳-۱۵ الف). زیرکن، اسفن‌های ثانویه و کانی‌های اپاک (مگنتیت) به عنوان کانی‌های فرعی در نمونه حضور دارند (شکل ۳-۱۵ الف).



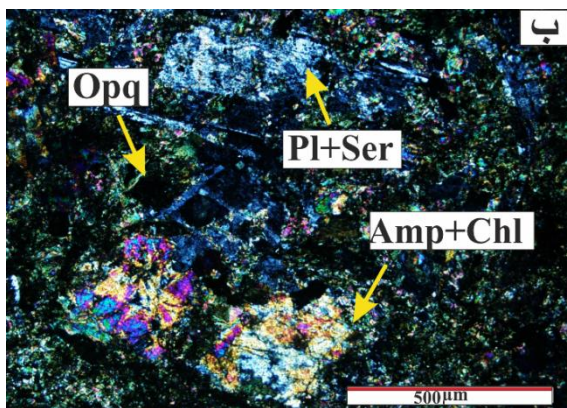
شکل ۳-۱۴: الف) تصویری از نمونه دستی مونزونیت که از منطقه لکه سیاه برداشت شده است، ب) تصویر میکروسکوپی از کانی‌های بیوتیت غنی از آهن، اپاک، و آپاتیت‌هایی که به داخل بیوتیت‌ها نفوذ کردند، و کلریت که به عنوان کانی ثانویه در نمونه مونزونیتی حضور دارند (PPL).



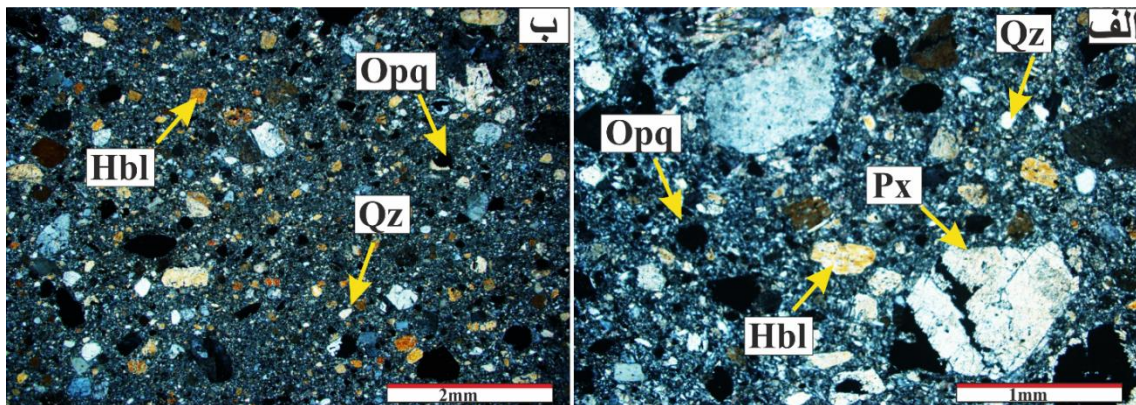
شکل ۳-۱۵: الف) تصویری از حضور بیوتیت، آپاتیت، زیرکن، کلریت، و اپاک که در نمونه مونزونیت منطقه لکه سیاه دیده می‌شوند (PPL)، ب) تصویری از پلاژیوکلازها و بیوتیت‌هایی که تحت تاثیر دگرسانی کلریتی و سرسیتی قرار گرفتند (XPL).

### ۳-۵-۲- دیوریت

دیوریت‌ها جزء سنگ‌های آذرین درونی حدواسط می‌باشند. این سنگ‌های نفوذی در جنوب منطقه اسفوردی (BS-T-2)، به صورت توده نیمه‌عمیق در متاسوماتیت‌های گزستان (BG-T-16) و همچنین در معدن چغارت (BC-T-28) رخنمون دارند. در نمونه دستی به دلیل اینکه عمدتاً از بلورهای تیره رنگ هورنبلند تشکیل شده‌اند به رنگ تیره مایل به سبز دیده می‌شوند (شکل ۳-۱۶ الف). فراوان‌ترین کانی موجود در دیوریت‌ها پلاژیوکلاز می‌باشد، که عمدتاً شکل دار تا نیمه‌شکل دار با ماکل پلی‌سنتتیک و کارلسباد قابل مشاهده است. پلاژیوکلازها غالباً تحت تاثیر دگرسانی‌های سرسیتی و اپیدوتی قرار گرفته‌اند. آمفیبول فراوان‌ترین کانی مافیک دیوریت‌ها است که معمولاً شکل دار و نیمه‌شکل دار می‌باشند که در معرض دگرسانی‌های کلریتی و اپیدوتی قرار گرفته‌اند (شکل ۳-۱۶ ب). کانی‌های پیروکسن نیز در زمینه سنگ دیوریتی به صورت پراکنده حضور دارد (شکل ۳-۱۷ الف). بافت پورفیروئید در نمونه‌های دیوریتی منطقه قابل مشاهده است، که استفاده از عنوان دیوریت پورفیری را برای نامگذاری آنها ممکن می‌سازد (شکل ۳-۱۷ ب).



شکل ۳-۱۶: الف) تصویری از نمونه دستی دیوریت که از منطقه گزستان برداشت شده است، ب) تصویر میکروسکوپی از کانی‌های آمفیبول و پلاژیوکلاز که در اثر دگرسانی کلریتی و سرسیتی قرار گرفتند (XPL).

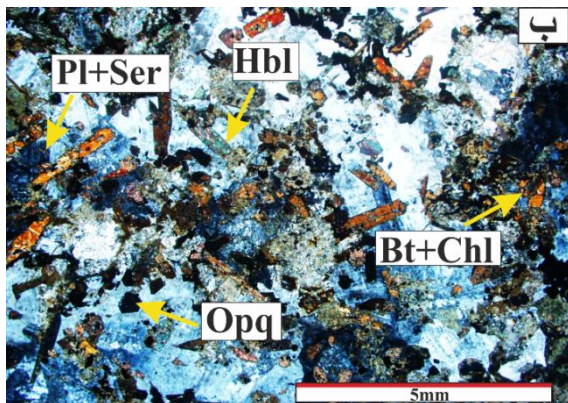


شکل ۳-۱۷: الف) تصویری از حضور کانی‌های پیروکسن، هورنبلند و کوارتز در نمونه دیوریتی منطقه گزستان (XPL)،  
 ب) تصویر میکروسکوپی از بافت پورفیری در نمونه دیوریتی منطقه (XPL).

### ۳-۵-۳- موزوسینیت

موزوسینیت‌ها سنگ‌های آذرین درونی حدواسطی هستند که در مناطق معدنی اسفوردی (BE-T-10) و لکه‌سیاه (BL-T-23) رخنمون دارند. در نمونه دستی و در ظاهر به علت وجود کانی‌های مافیک به رنگ‌های تیره دیده می‌شود. شکل‌های (۳-۱۸ الف) و (۳-۲۰ الف) به ترتیب تصاویر نمونه‌های دستی موزوسینیت از مناطق اسفوردی و لکه‌سیاه را نشان می‌دهند. در مقطع میکروسکوپی نمونه اسفوردی کانی‌های اصلی تشکیل دهنده سنگ شامل هورنبلند، بیوتیت، اورتوکلاز است (شکل‌های ۳-۱۸ ب و ۳-۱۹ الف). همچنین پیروکسن به صورت پراکنده و آلکالی فلدسپات نامتراکم در نمونه موزوسینیتی منطقه اسفوردی وجود دارد (شکل ۳-۱۹ ب). در نمونه موزوسینیتی منطقه لکه سیاه، کانی‌ها شامل آمفیبول‌های کلریتی شده به همراه کانی‌های کدر است که فضاهای خالی و شکستگی‌های آنها توسط کوارتز و کلسیت پر شده است (شکل ۳-۲۰ ب). همچنین آپاتیت به عنوان یک کانی فرعی به همراه کلسیت و کوارتز در نمونه موزوسینیتی لکه‌سیاه قابل مشاهده است (شکل ۳-۲۱ الف). پلاژیوکلاز از دیگر کانی‌هایی است که تحت دگرگونی سرسیتی قرار گرفته و به همراه آمفیبول‌ها و کانی‌های اپاک مشاهده می‌شود (شکل ۳-۲۱ ب). بافت‌های همسان دانه (دانه متوسط تا درشت) و افیتیک در سنگ‌های موزوسینیتی منطقه قابل مشاهده است.

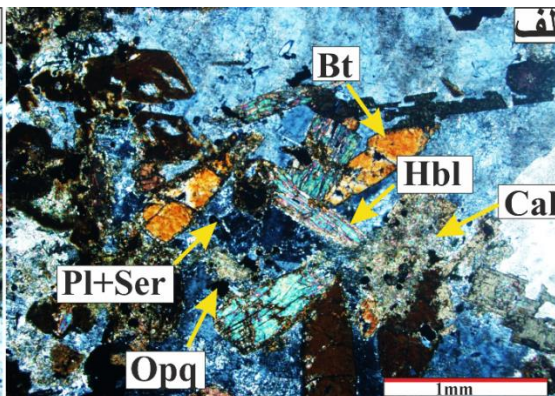
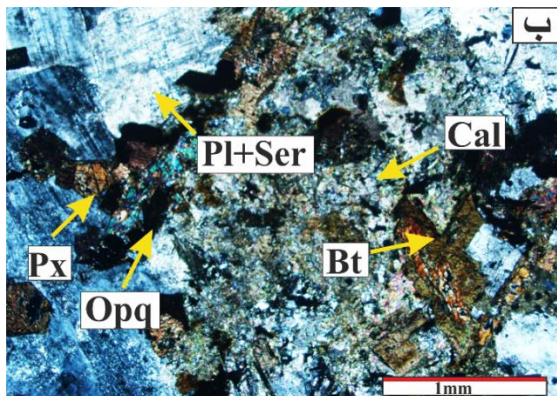




الف

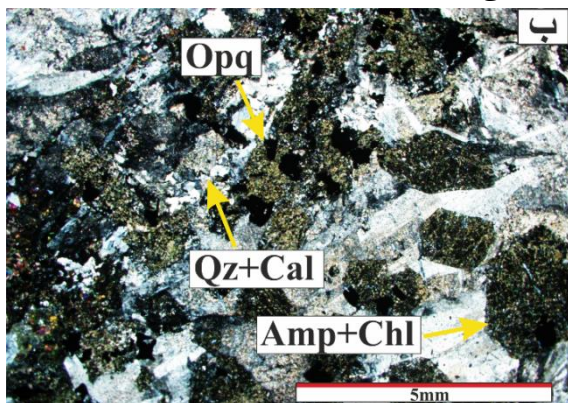


شکل ۳-۱۸: الف) تصویری از نمونه دستی مونزوسینیتی که از منطقه اسفوردی برداشت شده است. ب) تصویر میکروسکوپی از حضور بیوتیت‌های کلریتی شده، هورنبلند و پلاژیوکلازهای سریسیتی شده در نمونه مونزوسینیت (XPL).



الف

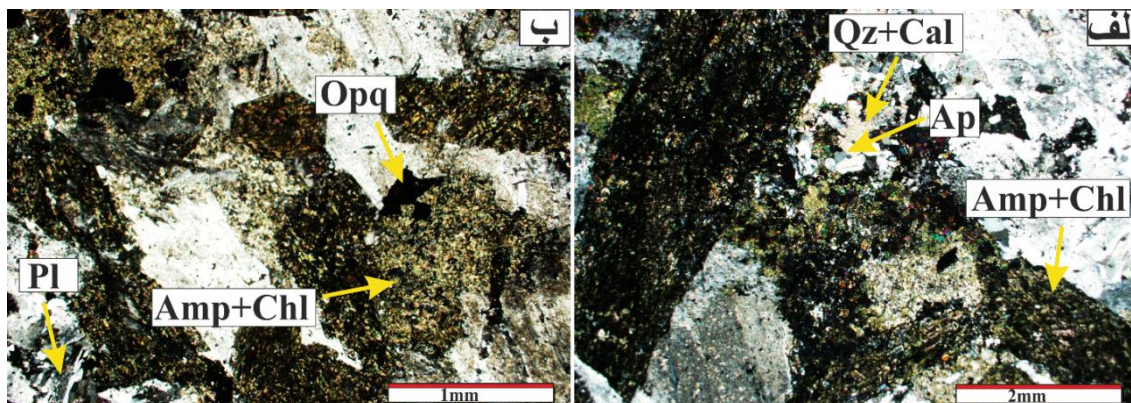
شکل ۳-۱۹: الف) تصویر میکروسکوپی از کانی‌های بیوتیت و هورنبلند به همراه پلاژیوکلازهای سریسیتی شده و کانی‌های ثانویه کلسیت (XPL)، ب) تصویری از حضور کانی‌های پیروکسن، بیوتیت، پلاژیوکلازهای سریسیتی شده، و کدر در زمینه‌ای از کلسیت در نمونه مونزوسینیتی منطقه اسفوردی (XPL).



الف



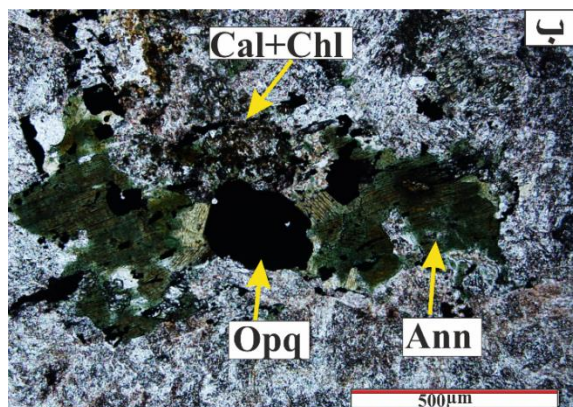
شکل ۳-۲۰: الف) تصویر نمونه دستی مونزوسینیتی که از منطقه لکه‌سیاه برداشت شده است، ب) تصویر میکروسکوپی از بلورهای درشت آمفیبول که کلریتی شده‌اند و به همراه کوارتز و کلسیت قابل مشاهده است (PPL).



شکل ۳-۲۱: الف) تصویری از حضور آمفیبول‌های کلریتی شده و کانی‌های ثانویه آپاتیت، کوارتز و کلسیت در نمونه مونوزوسینیتی منطقه لکه‌سیاه (PPL)، ب) تصویر میکروسکوپی از آمفیبول‌های کلریتی شده به همراه پلاژیوکلاز و کانی‌های کدر (PPL).

### ۳-۴-۵- سینیت

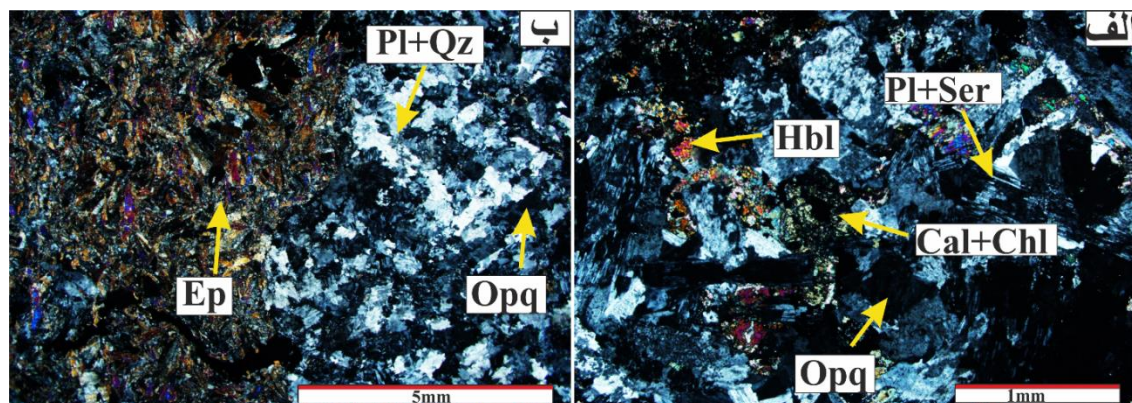
سینیت سنگ آذرین حدواسط درونی درشت دانه صورتی رنگ با ظاهر لوکوکرات است (شکل ۳-۲۲ الف). این سنگ‌ها در بخش‌های شمالی منطقه اسفوردی (BS-T-1)، در منطقه لکه‌سیاه (BL-T-22) و معدن چغارت رخنمون دارد (BC-T-26). کانی‌های اصلی در سینیت‌های منطقه شامل پلاژیوکلاز، ارتوکلاز، هورنبلند و بیوتیت‌های آهن‌دار (آنیت) می‌باشد (شکل ۳-۲۲ ب). از کانی‌های ثانویه در این سنگ‌ها می‌توان به سریسیت، اپیدوت، کلریت، کوارتز و کلسیت اشاره کرد، مگنتیت و پیریت نیز در حد مقادیر جزئی و به همراه کانی‌های ثانویه (به ویژه کلریت) در سنگ حضور دارند (شکل ۳-۲۳ ب). پلاژیوکلاز اغلب شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار و داری ماکل پلی‌سنیتیک می‌باشند. در طی دگرسانی برخی از پلاژیوکلازها به کانی سریسیت تبدیل شده‌اند. هورنبلند بیشترین کانی مافیک موجود در این سنگ‌ها می‌باشد که در اثر دگرسانی تا حدودی کلریتی شده‌اند (شکل ۳-۲۳ الف). آکالی فلدسپار فراوان‌ترین کانی‌های روشن در این سنگ‌ها هستند. این گروه کانی‌ها در سنگ‌های سینیتی اکثراً از نوع اورتوکلاز بوده که در زمینه سنگ به فراوانی مشاهده می‌شود. بافت غالب در سینیت‌های منطقه، از نوع دانه‌ای است (شکل ۳-۲۳ الف).



الف



شکل ۳-۲۲: الف) تصویری از نمونه دستی سینیت که از منطقه اسفوردی برداشت شده است، ب) تصویر میکروسکوپی از بیوتیت‌های سبز رنگ (آنیت) در زمینه‌ای از کانی‌های دگرسانی از قبیل کلریت و کلسیت در نمونه سینیتی منطقه (PPL)

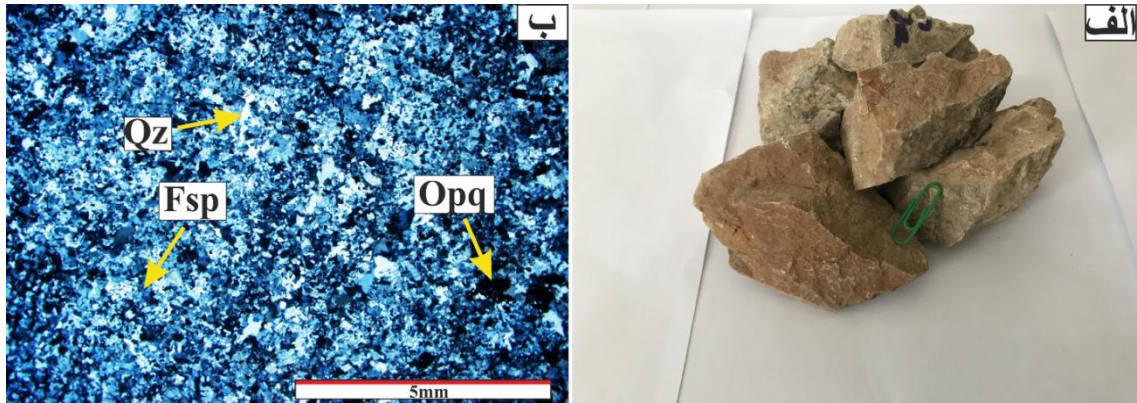


شکل ۳-۲۳: الف) تصویری از حضور هورنبلند، پلاژیوکلازهای سریسیتی شده به همراه دگرسانی‌های کلریتی و کلسیتی در نمونه سینیت منطقه اسفوردی (XPL)، ب) تصویری از همجواری اپیدوت با پلاژیوکلازها و کوارتز (XPL).

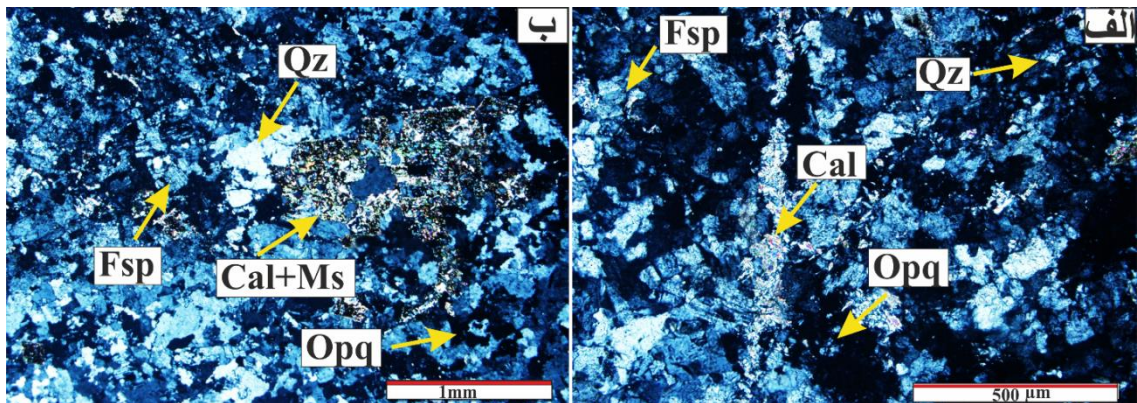
### ۳-۵-۵- آپلیت گرانیتی

این سنگ‌ها جز سنگ‌های آذرین درونی هستند و از نظر ترکیب جز سنگ‌های فلسیک می‌باشند. آپلیت گرانیت‌ها در بخش جنوبی منطقه اسفوردی به صورت دایک و توده‌های کوچک رخنمون دارند (BS-T-30). به لحاظ نمونه دستی، این سنگ‌ها به رنگ‌های روشن سفید تا کرم دیده می‌شوند (شکل ۳-۲۴ الف). کانی‌های اصلی سنگ شامل کوارتز و آلکالی فلدسپار می‌باشند که در یک فاز تاخیری تشکیل شده‌اند (شکل‌های ۳-۲۴ ب، و ۳-۲۵ الف) و به احتمال زیاد باقی مانده تبلور ماگماهای فلسیک در منطقه هستند و به صورت دایک و توده‌های کوچک مشاهده می‌شود. فازهایی از اکسیدهای آهن که حاصل تجزیه کانی‌های مافیک هستند نیز به همراه موسکوویت مشاهده می‌شود،

کلسیت نیز به عنوان کانی ثانویه در زمینه سنگ حضور دارد (شکل‌های ۳-۲۵ الف و ب). این سنگ‌ها از لحاظ بافت دارای بافت دانه‌ای ریز تا متوسط بلور و پوئی‌کلیتیک هستند (شکل ۳-۲۴ ب).



شکل ۳-۲۴: الف) تصویری از نمونه دستی آپلیت گرانیت که از منطقه اسفوردی برداشت شده است، ب) تصویر میکروسکوپی از بافت دانه‌ای در آپلیت گرانیت‌ها که کانی‌های آلکالی فلدسپار، کوارتز و کدر در آنها قابل مشاهده هستند.



شکل ۳-۲۵: تصویر میکروسکوپی حضور کانی‌های کوارتز و آلکالی فلدسپار در نمونه آپلیت گرانیتی که فضای بین آن‌ها را کلسیت پر کرده است (XPL)، ب) تصویری از حضور کانی‌های کوارتز و آلکالی فلدسپار به همراه موسکوویت و کلسیت در نمونه آپلیت گرانیت منطقه اسفوردی (XPL).

### ۳-۶- متاسوماتیت‌ها

متاسوماتیسم، نوعی دگرگونی است که با تغییر ترکیب سنگ کل در حالت جامد همراه است و در اغلب محیط‌های دگرگونی، به ویژه تمام دگرگونی‌های همبری، در درجه‌های مختلف رخ می‌دهد. البته، انواع، مقیاس‌ها و علل وقوع آن متغیر است. چون در خلال دگرگونی، مواد فرار به آسانی آزاد و متحرک می‌شوند، تغییر در مقدار مواد فرار سنگ‌ها، معمولاً از این امر مستثنی است و تغییرات

شیمیایی ایجاد کننده متاسوماتیسم، اغلب به توزیع مجدد گونه‌های غیر فرار محدود می‌شود (قاسمی).

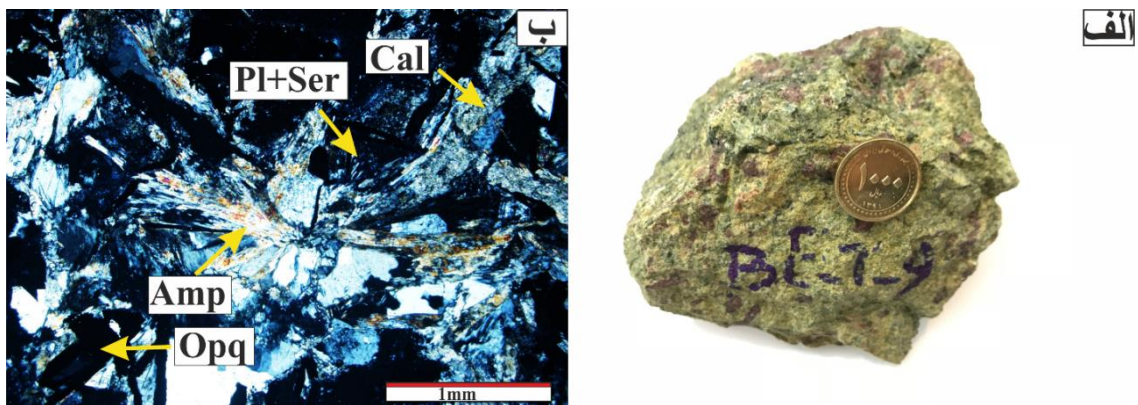
در منطقه مورد مطالعه، فرایند متاسوماتیسم به صورت گسترده و با شدت‌های مختلف، سبب دگرگونی در سنگ‌ها شده، و ناهمگنی خاصی در آن‌ها به وجود آورده است. متاسوماتیت‌ها در منطقه بافق گسترش زیادی دارند و میزبان کانه‌زائی‌های مگنتیت - آپاتیت هستند. از این سنگ‌ها در مناطق اسفوردی (BE-T-6,9)، لکه‌سیاه (BL-T-21) و چغارت (BC-T-25,27) نمونه‌هایی برداشت و مطالعه شده است. تعداد، شماره سریال، مختصات مکانی، کانی‌های سازنده و سنگ‌شناسی نمونه‌هایی که از متاسوماتیت‌های منطقه فلززایی بافق برای مطالعات سنگ‌نگاری انتخاب شده‌اند، در جدول (۳-۶) داده شده است.

جدول ۳-۶: شماره، مختصات مکانی، کانی‌های سازنده و نام سنگ نمونه‌های منتخب از متاسوماتیت‌ها.

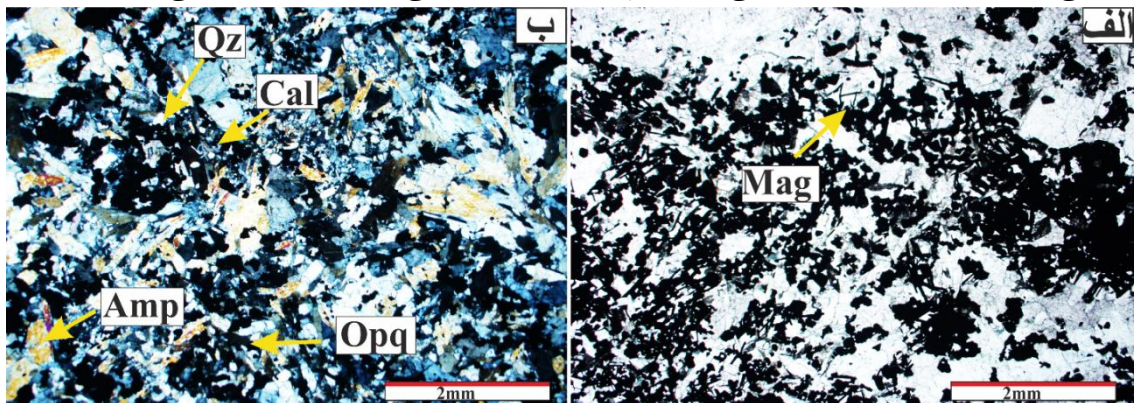
شماره نمونه	موقعیت جغرافیایی	کانی‌های شناسایی شده	نام سنگ
BE-T-6	X=370808 Y=3518447	آمفیبول، کلسیت، آپاتیت	متاسوماتیت
BE-T-9	X=371222 Y=3518338	آمفیبول، اپیدوت، کلریت، کلسیت، کوارتز	متاسوماتیت
BL-T-21	X=378548 Y=3517493	کوارتز، موسکوویت، آمفیبول، پلاژیوکلاز، سریسیت، کانی‌های کدر	متاسوماتیت
BC-T-25	X=355127 Y=3508020	آمفیبول، پلاژیوکلاز، کانی‌های کدر	متاسوماتیت
BC-T-27	X=355127 Y=3508020	کلسیت، کوارتز، آمفیبول، سریسیت	متاسوماتیت

بر اساس مطالعات سنگ‌نگاری از نمونه‌های متاسوماتیت‌ها، آمفیبول‌ها بیشترین کانی‌هایی هستند که در این نمونه‌ها مشاهده می‌شود و گاهاً دچار دگرسانی‌های کلریتی و اپیدوتی شده‌اند. این کانی‌ها به عنوان کانی مافیک محصول دگرسانی و به همراه کلسیت، کوارتز و مگنتیت در زمینه سنگ قابل مشاهده هستند (شکل‌های ۳-۲۶ ب و ۳-۲۷ ب). آپاتیت از کانی‌های فرعی است که خصوصاً در نمونه‌های متاسوماتیتی منطقه اسفوردی دیده می‌شود (شکل ۳-۲۸ الف). فازهای اکسید آهن که

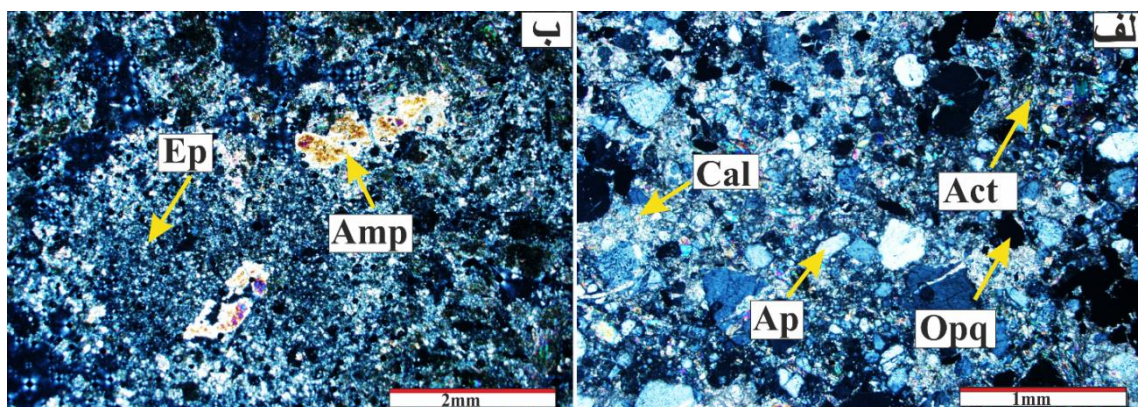
بیشتر تجمعی از مگنتیت است، در نمونه‌های متاسوماتیت‌ها مشاهده می‌شود (شکل ۳-۲۷ الف). به دلیل اینکه این سنگ‌ها محصول دگرسانی‌های شدید هستند، بنابراین دگرسانی‌های کلریتی، اپیدوتی، کلسیتی و ترمولیت - اکتینولیتی به وفور در مقاطع این نمونه‌ها قابل رویت است (شکل‌های ۳-۲۸ الف و ب). همچنین این دگرسانی‌ها در ایجاد رنگ سبز در نمونه دستی‌های این منطقه موثر است (شکل ۳-۲۶ الف).



شکل ۳-۲۶: الف) تصویری از نمونه دستی سنگ متاسوماتیتی از منطقه اسفوردی، ب) تصویر میکروسکوپی از حضور کانی‌های آمفیبول که به صورت شعاعی به همراه پلاژیوکلازهای سرسیتی شده و کلسیت دیده می‌شوند (XPL).



شکل ۳-۲۷: الف) تصویری از اجتماع اکسیدهای آهن (مگنتیت) که در نمونه متاسوماتیت چگارت وجود دارند (PPL)، ب) تصویری از حضور آمفیبول به همراه کوارتز، کلسیت و مگنتیت در نمونه متاسوماتیتی چگارت (XPL).



شکل ۳-۲۸: الف) تصویری از بلورهای آپاتیت و مگنتیت که در زمینه‌ای متشکل از کانی‌های دگرسانی از قبیل کلسیت، ترمولیت، و اکتینولیت در نمونه متاسوماتیتی اسفوردی قرار گرفته‌اند (XPL)، ب) تصویری از حضور آمفیبول-های در حال دگرسانی که در زمینه‌ای از اپیدوت در نمونه متاسوماتیتی اسفوردی قرار گرفته‌اند (XPL).

### ۳-۷- اسکارن‌ها

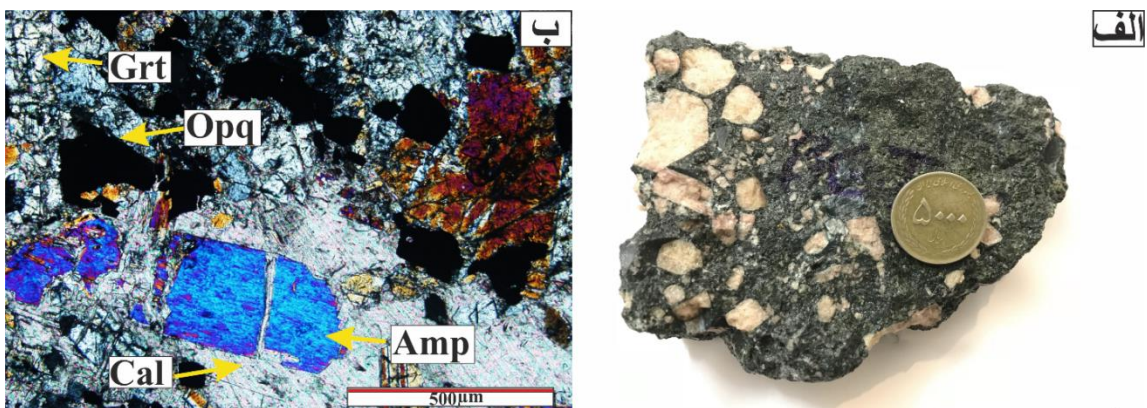
توده‌های نفوذی با ترکیب سینیت، دیوریت، دیوریت‌های غنی از بیوتیت در تماس با واحدهای توفی، دولومیتی و ماسه‌سنگی سری ریزو سبب دگرگونی مجاورتی آن‌ها شده‌اند. در منطقه اسفوردی سنگ-های نفوذی سینیتی در تماس با واحدهای آهک‌های توفی و دولومیتی سبب ایجاد منطقه اسکارن شده‌اند. در منطقه لکه‌سیاه سنگ‌های اسکارن در تماس با مونزونیت، با واحدهای توفی ماسه‌سنگی و دولومیتی ایجاد شده‌اند. در منطقه چغارت سنگ‌های اسکارنی در تماس سینیت با متاسوماتیت تشکیل شده‌اند. تعداد، شماره سریال، مختصات مکانی، کانی‌های سازنده و سنگ‌شناسی نمونه‌هایی که از مناطق اسکارنی در منطقه فلرزایی بافق برای مطالعات سنگ‌نگاری انتخاب شده‌اند، در جدول (۳-۷) داده شده است.

جدول ۳-۷: شماره، مختصات مکانی، کانی‌های سازنده و نام سنگ نمونه‌های منتخب از سنگ‌های اسکارن.

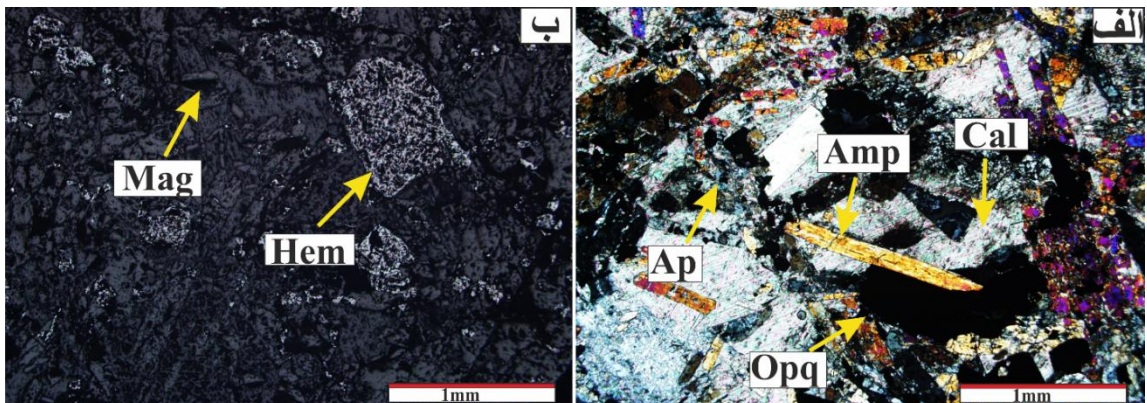
شماره نمونه	موقعیت جغرافیایی	کانی‌های شناسایی شده	نام سنگ
BC-TP-11	X=355086 Y=3508288	پیروکسن، کلسیت، گارنت، آپاتیت	اسکارن

شکل (۳-۲۹ الف)، تصویر نمونه دستی از سنگ اسکارن در منطقه چغارت را نشان می‌دهد. بر اساس مطالعات سنگ‌نگاری بر روی نمونه‌های اسکارن از منطقه چغارت، آمفیبول عمده‌ترین کانی تشکیل

دهنده آن است که به صورت هم رشدی با کانی‌های محصول دگرسانی متاسوماتیسم (کلسیت، گارنت، مگنتیت، و آپاتیت) مشاهده می‌شود. گارنت به صورت پراکنده در مقطع قابل مشاهده است (شکل ۳-۲۹). آپاتیت از کانی‌های فرعی است که به همراه کانی‌های کدر در زمینه‌ای از کلسیت و آمفیبول حضور دارد (شکل ۳-۳۰ الف). بخش‌های اکسید آهن این نمونه شامل مگنتیت و هماتیتی شده است (شکل ۳-۳۰ ب).



شکل ۳-۲۹: الف) تصویری از نمونه دستی اسکارن که از منطقه چغارت برداشت شده است، ب) تصویر میکروسکوپی از حضور گارنت، آمفیبول و کانی‌های کدر (مگنتیت) در زمینه‌ای از کلسیت در نمونه اسکارنی منطقه چغارت (XPL).



شکل ۳-۳۰: الف) تصویری از هم‌رشدی کانی‌های آمفیبول و کلسیت به همراه کانی‌های فرعی آپاتیت و مگنتیت ب) تصویر میکروسکوپی از بخش‌های اکسید آهن که عمدتاً مگنتیت و هماتیتی شده هستند (XPL)، ب) تصویر میکروسکوپی از بخش‌های اکسید آهن که عمدتاً مگنتیت و هماتیتی شده هستند (PPL).



فصل چهارم

کافی شناسی، ساخت، بافت

و

توالی پارازیتیکافی کافی ها

در منطقه فلززایی بافق، طیفی از کانه‌زایی‌های آهن، فسفر، سرب، روی، منگنز، عناصر خاکی کمیاب، اورانیوم، توریم و ... تشکیل شده است. از آنجایی که پژوهش حاضر بر روی کانسارهای آهن و آپاتیت و توان عناصر خاکی کمیاب آن‌ها در مناطق معدنی اسفوردی، گزستان، لکه‌سیاه و چغارت تمرکز دارد، بنابراین، کانسارهای این مناطق از نظر کانی‌شناسی، ساخت و بافت بررسی شده است. بر پایه مشاهدات صحرایی کانسارهای آهن و آپاتیت منطقه بافق توسط سری‌های آتشفشانی- رسوبی نئوپروتوزوئیک پسین- کامبرین پیشین می‌شوند. سنگ میزبان این کانسارها در نتیجه رخداد فرایندهای متاسوماتیکی درجات متفاوتی از دگرسانی را متحمل شده‌اند به طوری که در مواردی تشخیص سنگ اولیه و مادر آن‌ها غیر ممکن می‌باشد. در مطالعه حاضر از این سنگ‌ها تحت عنوان متاسوماتیت نام برده شده است. همیافتی بسیار نزدیکی میان کانه‌زایی آهن و آپاتیت با متاسوماتیت‌ها وجود دارد. از نظر شکل ظاهری (ساختار)، کانه‌زایی‌ها در منطقه فلززایی بافق به شکل‌های لامینه‌ای، توده‌ای، رگه -رگچه‌ای، داربستی، دانه‌پراکنده، پر کننده فضاهای خالی و برشی مشاهده می‌شود. میزان و گسترش این ساختارها میان مناطق مختلف معدنی متفاوت است ولی در مجموع ساختارهای توده‌ای نسبت به شکل‌های دیگر کانه‌زایی غالب است. از نظر کانی‌شناسی مگنتیت، آپاتیت، هماتیت، اسپیکیولاریت، گوتیت، لیمونیت، پیرولوسیت، ترمولیت، اکتینولیت، گارنت، پیروکسن، آمفیبول، بیوتیت، کلریت، اپیدوت، کلسیت، و کوارتز از کانی‌های سازنده کانسنگ‌ها می‌باشد، که در این میان کانه‌های مگنتیت، آپاتیت، هماتیت و پیرولوسیت دارای ارزش اقتصادی هستند. بر پایه فراوانی کانه‌های مگنتیت و آپاتیت، کانسارهای منطقه فلززایی بافق به انواع غنی از مگنتیت، مگنتیت - آپاتیت و غنی از آپاتیت تقسیم می‌شوند. حتی در مقیاس یک کانسار خاص نیز، بر اساس عیارهای آهن و فسفر، کانسار به بلوک‌های غنی از آهن (مگنتیت)، مگنتیت - آپاتیت و غنی از فسفر (آپاتیت) طبقه‌بندی می‌شود. در منطقه فلززایی بافق، کانسنگ‌های مگنتیت و مگنتیت - آپاتیت فراوانی بیشتری دارند، در حالی که کانسنگ‌های غنی از آپاتیت کمتر توسعه یافته است. کانسارهای مگنتیت

– آپاتیت (به‌ویژه کانسنگ‌های غنی از آپاتیت) منطقه بافق از نظر فلززائی عناصر خاکی کمیاب نیز حائز اهمیت هستند.

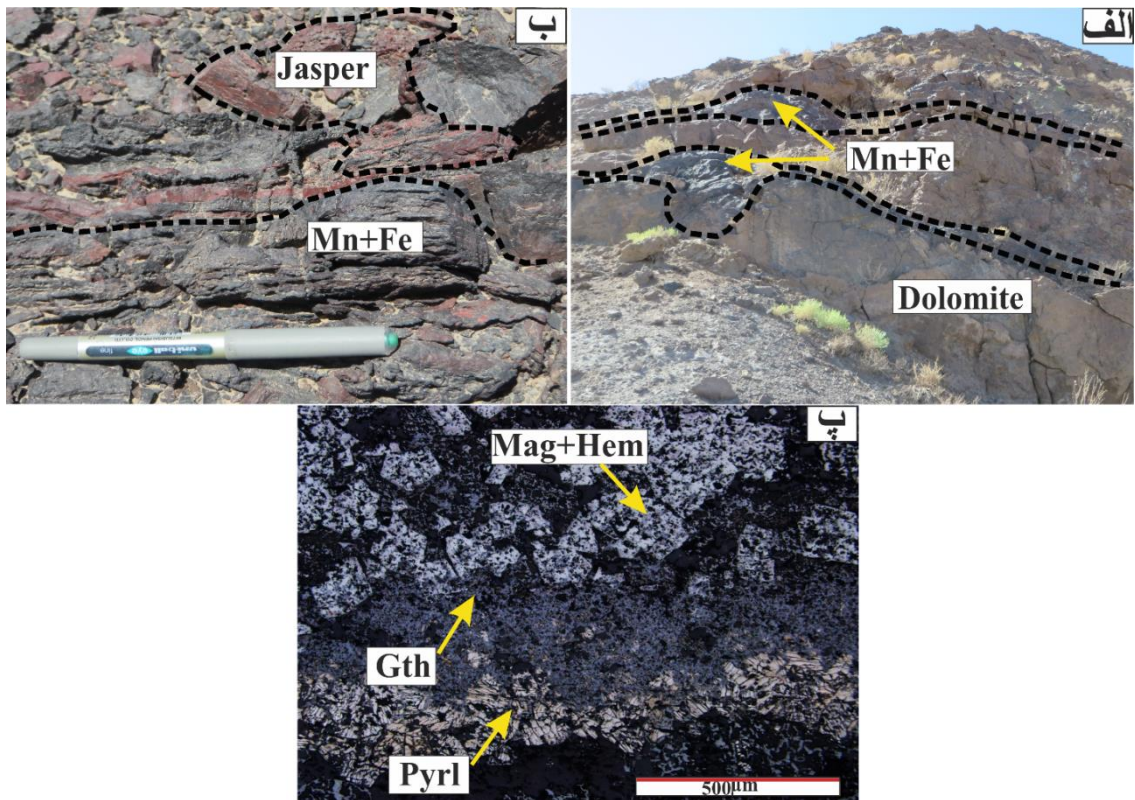
در ادامه، ابتدا به شرح کامل شکل‌های مختلف (ساختارهای) کانه‌زایی‌های آهن، فسفر و منگنز، و پس از آن به کانی‌شناسی و توالی پاراژنزی کانه‌زائی‌ها در منطقه فلززائی بافق پرداخته می‌شود.

#### ۴-۲- شکل‌های مختلف کانه‌زائی در منطقه فلززائی بافق

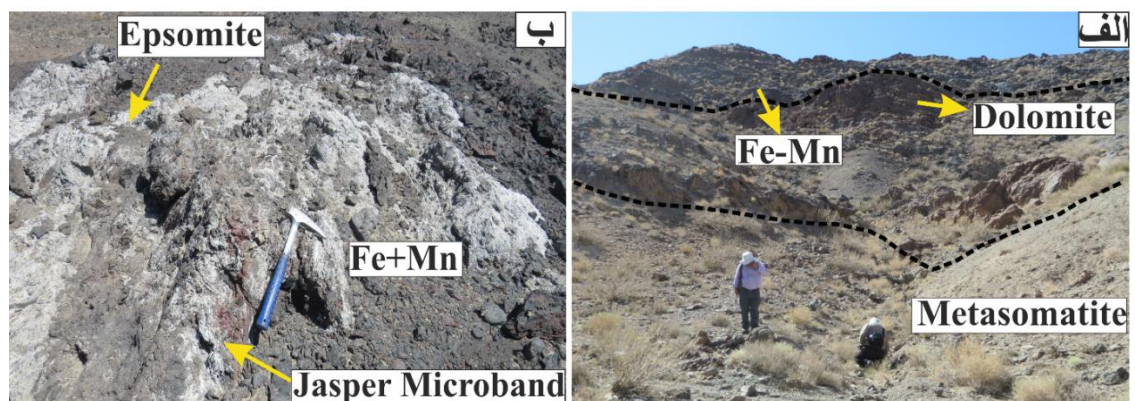
همان‌گونه که در مقدمه این بخش بیان شد، از نظر شکل ظاهری (ساختار) کانه‌زایی‌ها در منطقه فلززائی بافق به شکل‌های لامینه‌ای، توده‌ای، رگه –رگچه‌ای، داریستی، دانه‌پراکنده، پرکننده فضاهای خالی و برشی مشاهده می‌شوند. میزان و گسترش این ساختارها میان مناطق مختلف معدنی متفاوت است ولی در مجموع ساختارهای توده‌ای نسبت به شکل‌های دیگر کانه‌زایی غالب هستند. در ادامه ویژگی‌های هر کدام از ساختارهای کانه‌زائی به طور جداگانه توصیف می‌گردد.

#### ۴-۲-۱- ساخت و بافت لامینه‌ای (نواری)

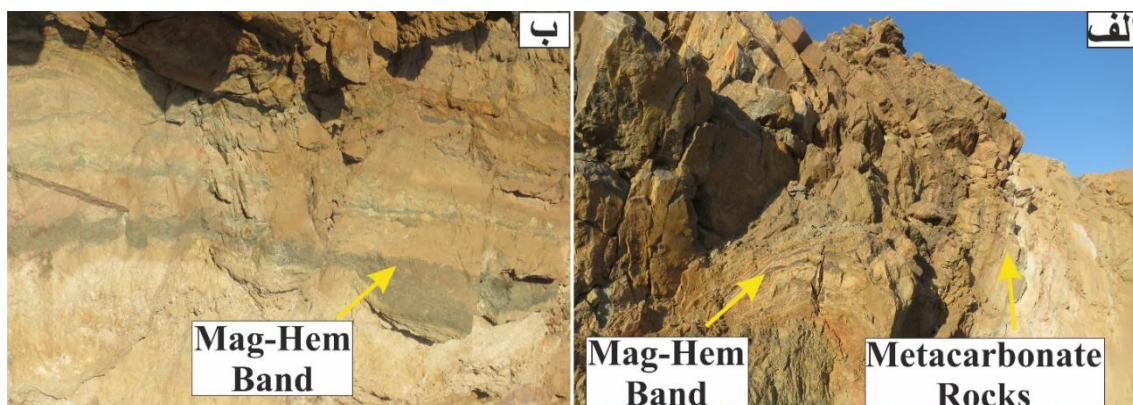
بر اساس مشاهدات صحرایی این نوع ساخت و بافت بیشتر در منطقه اسفوردی (بخش‌های غربی و جنوب‌غربی معدن آپاتیت اسفوردی) وجود دارد. در توالی سری ریزو، این شکل از کانه‌زائی به صورت بین لایه‌ای با دولومیت، ماسه‌سنگ، شیل توفی، بازالت و متاسوماتیت‌ها مشاهده می‌شود (شکل ۴-۱ الف و ۴-۲ الف). کانه‌زائی لامینه‌ای، نوارهایی از سیلیس‌های آهن‌دار (ژاسپیلیت) با اکسیدهای منگنز – آهن را شامل می‌شود (شکل ۴-۱ ب). بر اساس مطالعات میکروسکوپی، نوارهای روشن پیرولوزیت در کنار نوارهای خاکستری رنگ مگنتیت‌های هماتیته شده و گوتیت، بافت لامینه‌ای در این نوع کانه‌زائی را نشان می‌دهند (شکل ۴-۱ پ). اپسومیت‌ها به صورت ثانویه و تحت شرایط هوازدگی سطحی در قسمت روبی اکسیدهای منگنز – آهن نواری در منطقه اسفوردی تشکیل شده‌اند (شکل ۴-۲ ب). بر اساس پیمایش‌های صحرایی، این نوع ساخت و بافت در منطقه لکه‌سیاه به صورت نوارهایی غنی از مگنتیت و هماتیت در توالی متاکربنات‌ها دیده می‌شود (شکل ۴-۳ الف، ب).



شکل ۴-۱: الف) تصویری از کانه‌زایی منگنز - آهن به شکل لامینه‌ای (چینه‌سان) در میان لایه‌های دولومیت و آهک دولومیتی در منطقه اسفوردی، ب) تصویری از کانه‌زایی چینه‌سان منگنز و آهن به همراه ژاسپیلیت‌ها در منطقه اسفوردی، پ) بافت لامینه‌ای (نواری) میکروسکوپی از کانه‌های پیرولوژیت، مگنتیت‌های هماتیته شده و گوتیت از توالی اکسیدهای منگنز - آهن و ژاسپیلیت‌ها.



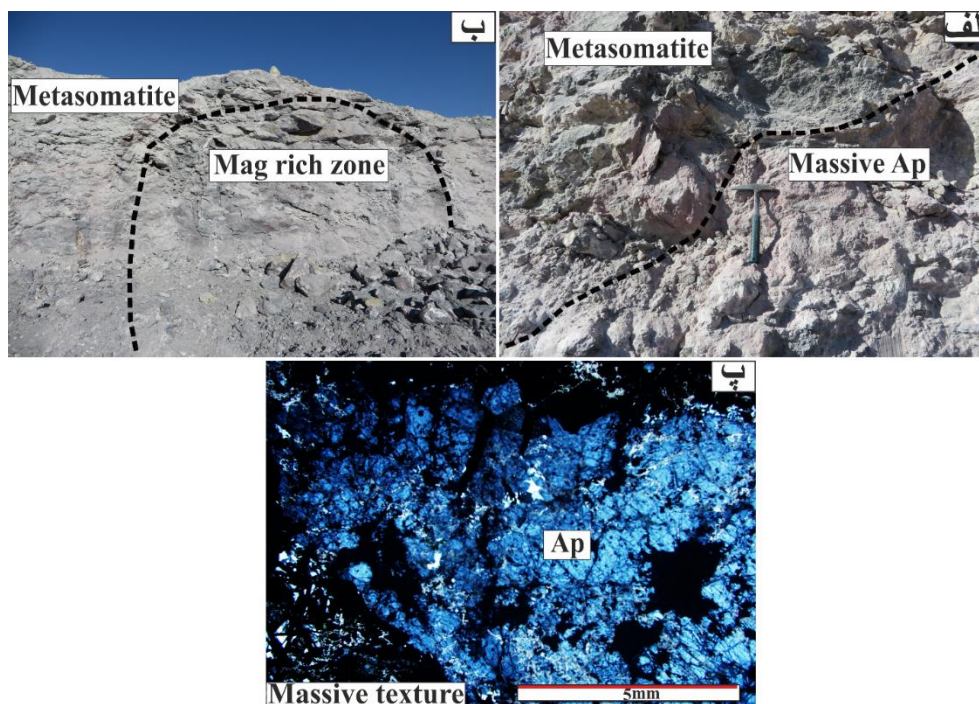
شکل ۴-۲: الف) تصویری از توالی سری ریزو در منطقه اسفوردی که در بخش‌های بالایی به همراه دولومیت، کانه‌زایی چینه‌سان آهن و منگنز رخ داده است (نگاه به جنوب - جنوب شرق)، ب) تصویری از تشکیل کانی ثانویه اپسومیت بر روی افق‌های منگنز - آهن و ژاسپیلیت در منطقه معدنی اسفوردی.



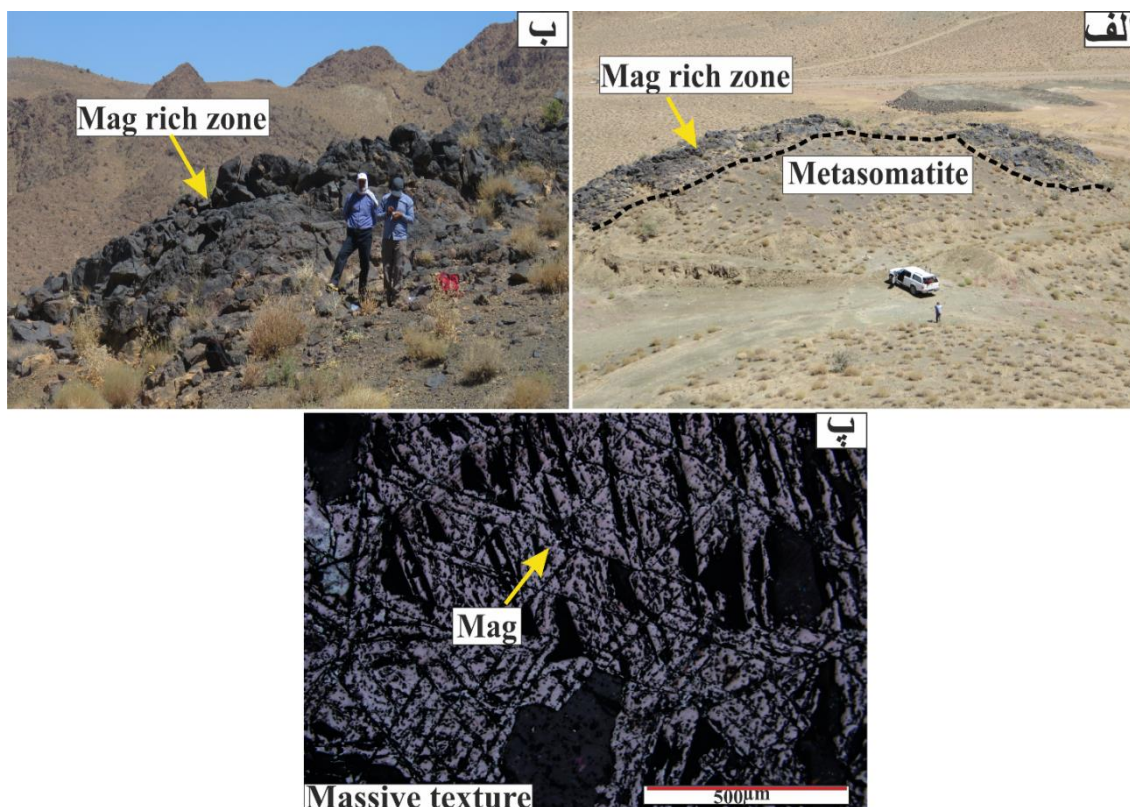
شکل ۴-۳: الف و ب) تصویری از کانه‌زائی لامینه‌ای (نواری) آهن (مگنتیت و هماتیت) در متاکربنات‌های سری ریزو در منطقه لکه‌سیاه.

#### ۴-۲-۲- ساخت و بافت توده‌ای

ساخت و بافت توده‌ای یکی از شاخص‌ترین شکل‌های کانه‌زایی آهن - آپاتیت در منطقه معدنی بافق (چغارت، اسفوردی، لکه‌سیاه و گزستان) است. بر اساس مشاهدات صحرایی، در منطقه اسفوردی کانه‌زائی آپاتیت و مگنتیت اغلب به صورت توده‌های غنی از آپاتیت، آپاتیت - مگنتیت و غنی از مگنتیت در داخل سنگ‌های آتشفشانی به شدت دگرسان شده (متاسوماتیت‌ها) مشاهده می‌شود (شکل ۴-۴ الف، ب). بررسی‌های صورت گرفته توسط (ایرانمنش و همکاران، ۱۳۹۸)، ساخت توده‌ای را به عنوان متداول‌ترین برونزد آپاتیت‌ها در منطقه اسفوردی شناسایی کردند. مطالعات کانه‌نگاری نیز بافت توده‌ای از آپاتیت و مگنتیت را در معدن اسفوردی نشان می‌دهند (شکل ۴-۴ پ).

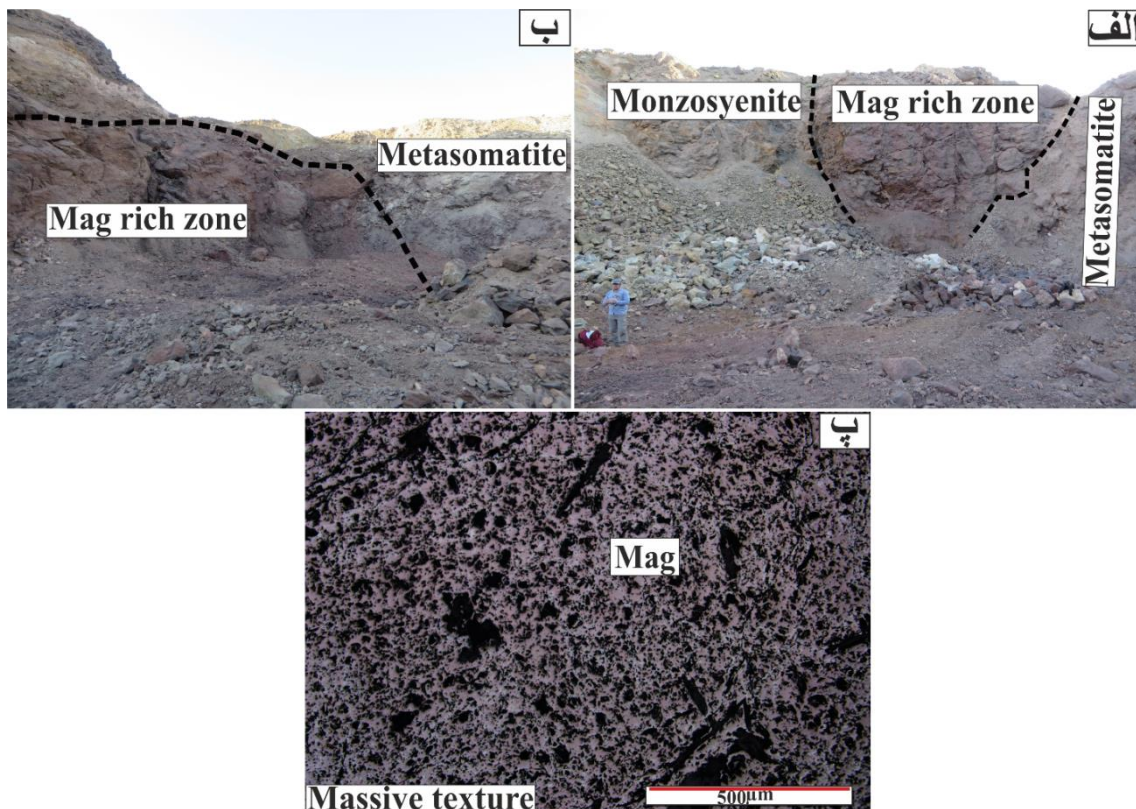


شکل ۴-۴: الف) کانه‌زایی توده‌ای آپاتیت در داخل سنگ‌های متاسوماتیتی میزبان در معدن اسفوردی، ب) کانه‌زایی توده‌ای غنی از مگنتیت در معدن اسفوردی، پ) تصویر میکروسکوپی از بافت توده‌ای آپاتیت در منطقه اسفوردی. در کانسار آهن - آپاتیت گزستان، ساخت و بافت توده‌ای بیشترین بخش کانه‌زایی را تشکیل داده است. در این منطقه، توده غنی از مگنتیت (آپاتیت) به شکل یک عدسی بزرگ در سنگ‌های متاسوماتیتی سبز رنگ رخمون دارد (شکل‌های ۴-۵ الف، ب). مطالعات کانه‌نگاری نیز بافت توده‌ای از مگنتیت را در کانسار گزستان نشان می‌دهند (شکل ۴-۴ پ). دانه‌های مگنتیت به صورت توده‌ای، رگه‌ای و پراکنده وجود دارند. گاهی این دانه‌ها با زاویه ۱۲۰ درجه در کنار هم قرار دارند که این خود از مشخصه‌های مگنتیت ماگمایی است (Eslamizadeh, 2016).



شکل ۴-۵: الف) رخنمون کانسنگ مگنتیت (آپاتیت) توده‌ای در سنگ‌های متاسوماتیتی میزبان در منطقه گزستان. ب) تصویر نزدیک از کانسنگ مگنتیت (آپاتیت) توده‌ای در منطقه گزستان پ) تصویر میکروسکوپی از بافت توده‌ای مگنتیت از بخش مگنتیتی کانسار گزستان.

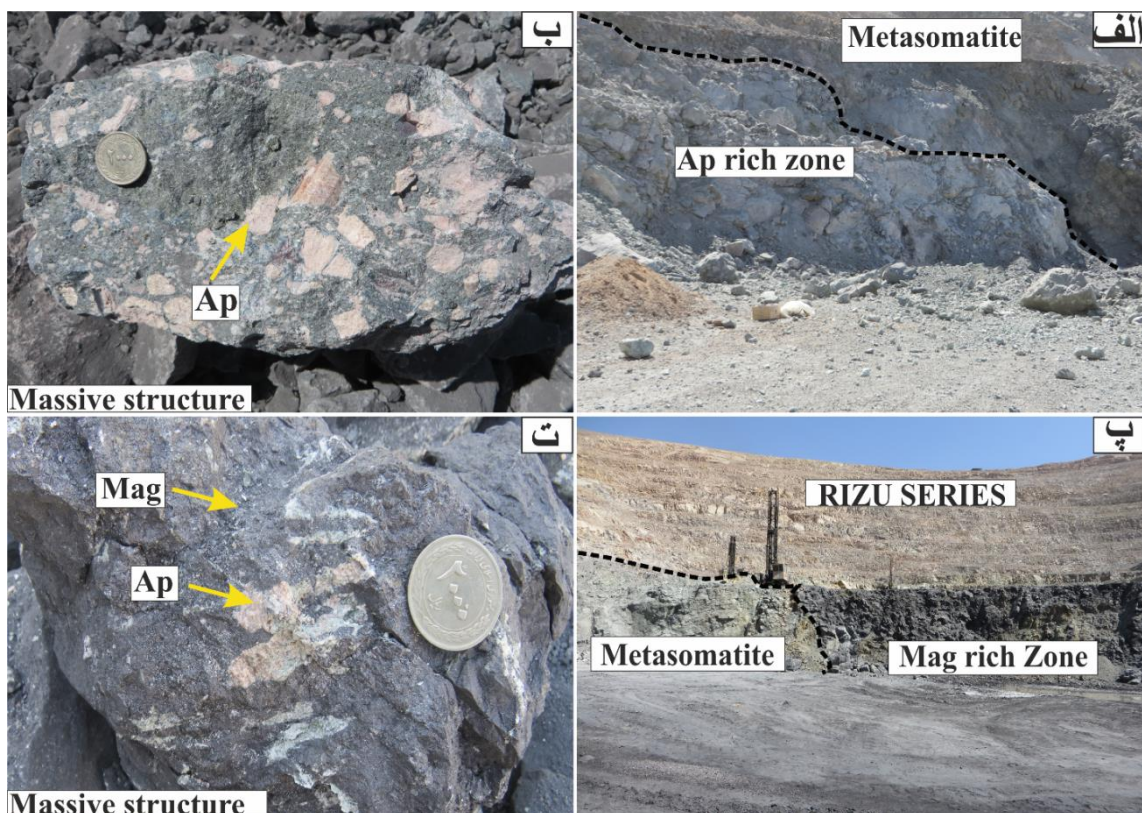
در منطقه لکه‌سیاه، کانه‌زائی آهن اغلب به شکل توده‌ای در دیواره بخش معدنکاری شده نمایان است. سری ریزو با رخساره آتشفشانی - رسوبی مشتمل بر دولومیت، شیل، ماسه‌سنگ، توف و گدازه ریولیتی و متاسوماتیت‌ها، سنگ میزبان کانه‌زائی است. بر پایه شواهد صحرایی، توده معدنی آهن در منطقه تماس توده دیوریتی با متاسوماتیت‌ها قرار دارد (شکل ۴-۶ الف، ب). مطالعات کانه‌نگاری از منطقه لکه‌سیاه نیز بیانگر حضور مگنتیت با بافت توده‌ای می‌باشد (شکل ۴-۶ پ). در بخش‌هایی از کانسار، آپاتیت نیز کانه مگنتیت را همراهی می‌نماید. بر اساس مطالعات (رستمی، ۱۳۹۷) نیز کانسنگ اکسید آهن در منطقه لکه‌سیاه به صورت توده‌ای با طول تقریبی ۲۵ متر و پهنای ۱۵ متر و به رنگ سیاه تا قهوه‌ای مایل به قرمز رخنمون دارد که در مواردی همراه با مگنتیت کانی‌های کوارتز و آپاتیت نیز دیده می‌شود.



شکل ۴-۶: الف) تصویری از کانه‌زایی توده‌ای مگنتیت (آپاتیت) در معدن لکه‌سیاه که بخش غنی از مگنتیت به شکل عدسی در داخل سنگ‌های سبز نمایان است، در تماس کانه‌زایی آهن با متاسوماتیت‌ها آثار کوچکی از مونزوسینیت نیز مشاهده می‌گردد. ب) توده‌های غنی از مگنتیت در میان متاسوماتیت‌ها و واحدهای سری ریزو در معدن اسفوردی، پ) تصویر میکروسکوپی از کانه‌زایی توده‌ای مگنتیت در منطقه لکه‌سیاه.

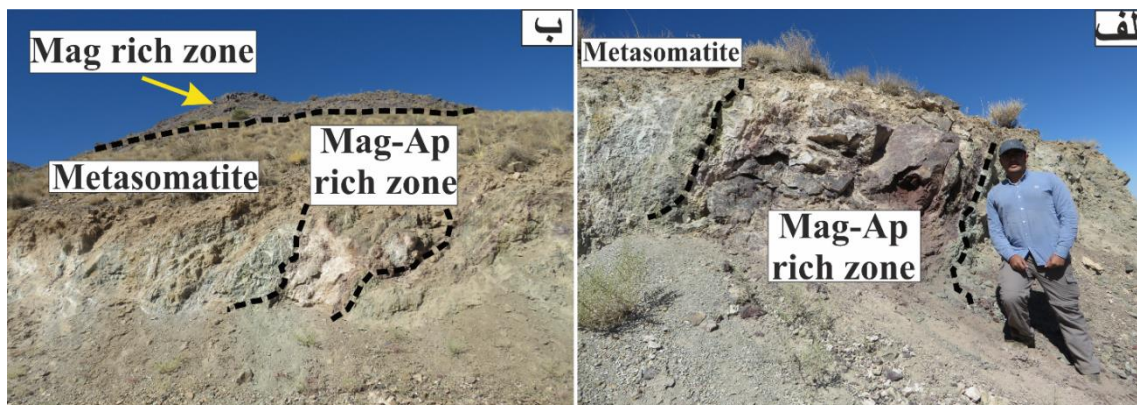
بر اساس شواهد صحرایی ساخت و بافت توده‌ای در معدن چغارت به صورت بخش‌های غنی از مگنتیت، مگنتیت - آپاتیت و آپاتیت دیده می‌شود. در حال حاضر و در نتیجه فعالیت‌های معدنکاری، بخش‌های غنی از مگنتیت در قسمت‌های پایینی چاله معدن و در میان متاسوماتیت‌ها دیده می‌شود. در ترازهای بالایی دیواره‌های معدن، توالی سنگ‌های سری ریزو بخوبی مشخص هستند. بلورهای آپاتیت به صورت پراکنده در بخش‌های غنی از مگنتیت نیز دیده می‌شوند (شکل ۴-۷ پ، ت). در معدن چغارت قسمت‌های غنی از آپاتیت در بخش‌های فوقانی و اطراف کانسنگ مگنتیتی و در میان متاسوماتیت‌ها دیده می‌شود. در کانسنگ توده‌ای آپاتیت، کانی آپاتیت به صورت بلورهای منفرد صورتی رنگ و یا تجمعی از چندین بلور تشکیل شده است (شکل ۴-۷ الف، ب).





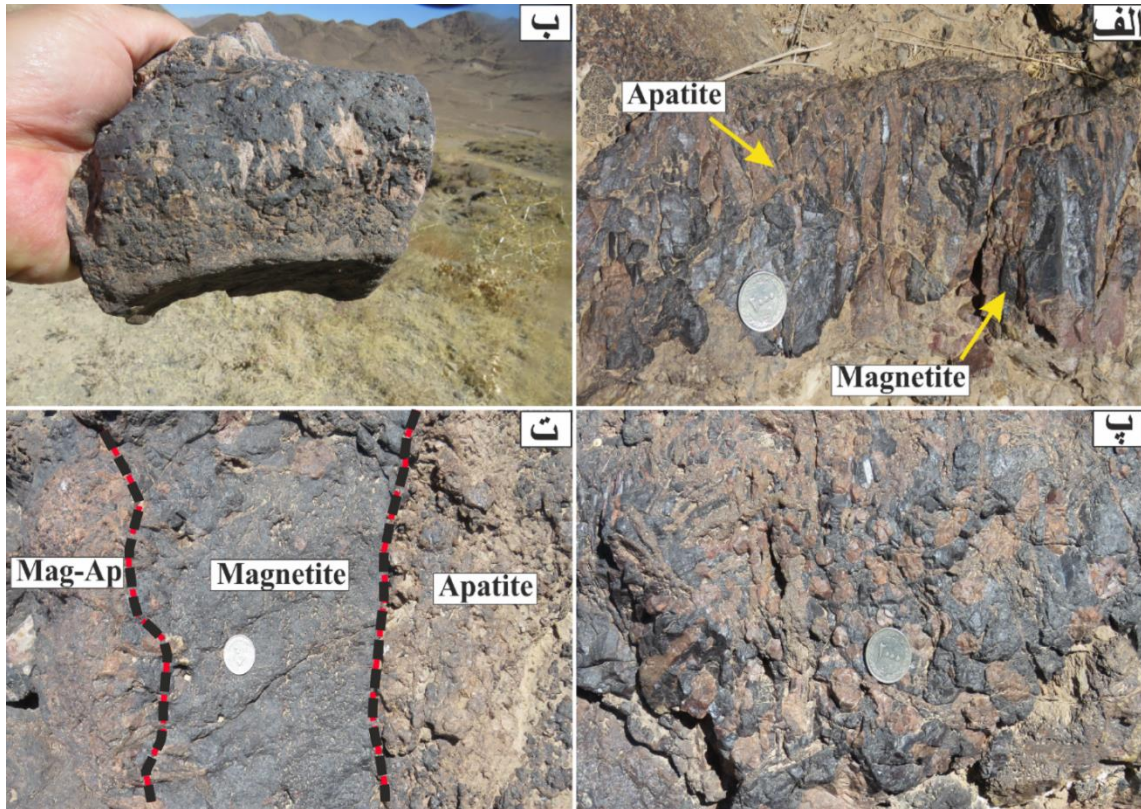
شکل ۴-۷: الف) تصویری از معدن چغارت که در آن کانه‌زایی توده‌ای آپاتیت‌ها در میان سنگ‌های متاسوماتیتی شده قابل مشاهده است، ب) تصویر نزدیک از کانه‌زایی توده‌ای آپاتیت در منطقه چغارت که تجمعی از بلورهای آپاتیت در آن دیده می‌شود، پ) تصویر بخش غنی از مگنتیت در معدن چغارت که در تماس با سنگ‌های سری ریزو و متاسوماتیت‌ها قرار دارد، ت) تصویر نزدیک از کانه‌زایی توده‌ای شکل مگنتیت که در آن آپاتیت نیز به چشم می‌خورد.

ساخت توده‌ای در منطقه فلززائی بافق به شکل دایک‌های غنی از آپاتیت و مگنتیت نیز مشاهده می‌شود. بر اساس شواهد صحرایی ساخت مذکور در منطقه گزستان و اسفوردی قابل مشاهده است در ترکیب دایک، مقدار آپاتیت بیشتر از مگنتیت است ولی پراکندگی آپاتیت در همه جای دایک یکنواخت نیست. سنگ‌های متاسوماتیتی سبز رنگ میزبان این شکل از کانه‌زائی هستند و به سمت بالادست بر روی آنها گدازه‌های بازالتی و بازالت آندزیتی قرار دارد (شکل ۴-۸ الف، ب).



شکل ۴-۸ الف) کانه‌زایی آپاتیت و مگنتیت که به صورت دایک در میان متاسوماتیت‌ها در منطقه گزستان نمایان است، (ب) تصویری از کانه‌زایی دایکی شکل آپاتیت و مگنتیت در داخل متاسوماتیت‌ها، که بر روی آنها گدازه‌های بازالتی و بازالت آندزیتی قرار دارد.

چنانچه در مطالب بالا گفته شد کانه‌زایی توده‌ای در منطقه گزستان همانند سایر مناطق مورد مطالعه، بسته به میزان فراوانی کانی‌های مگنتیت و آپاتیت به بخش‌های غنی از مگنتیت، مگنتیت - آپاتیت و غنی از آپاتیت طبقه‌بندی می‌شود. در کانسنگ‌های مگنتیت - آپاتیت، گاهی بلورهای درشت و صورتی رنگ آپاتیت به حالت بین انگشتی با مگنتیت، و یا به صورت بلورهای پراکنده در زمینه مگنتیتی مشاهده می‌شوند، که می‌تواند نشانی از تبلور همزمان دو کانی از یک سیال واحد باشد (شکل‌های ۴-۹ الف تا پ). رنگ آپاتیت‌های قرمز که در کانسار گزستان به فراوانی یافت می‌شود به دلیل وجود شبکه متراکمی از سیال‌های درگیر مایع و جامد است. بلورهای آپاتیت به صورت قطعات خرد شده هستند و آپاتیت‌های گزستان مقادیر زیادی مونازیت دارند که مونازیت‌های سبز رنگ جوان-تر، در بین شکاف‌های آپاتیت شکل گرفته‌اند (Dehgan-zadeh Bafghi et al., 2019). در بخش‌هایی از کانسار گزستان، کانه‌زایی توده‌ای به شکل بخش‌های غنی از مگنتیت، آپاتیت و آپاتیت-مگنتیت همزمان در کنار هم دیده می‌شوند، که نشان از تغییر ترکیب شیمیایی سیال در طول تبلور کانی‌ها دارد (شکل ۴-۹ ت).

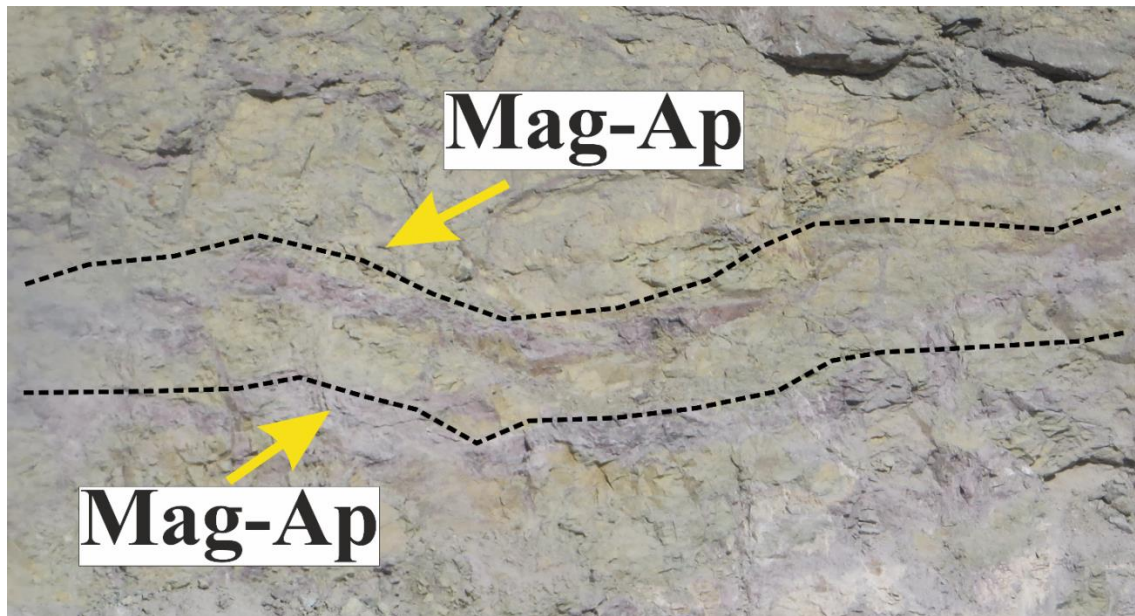


شکل ۴-۹: الف و ب) بلورهای درشت و صورتی رنگ آپاتیت به حالت بین انگشتی با مگنتیت، پ) بلورهای پراکنده آپاتیت در زمینه مگنتیتی از کانسنگ توده‌ای مگنتیت - آپاتیت، ت) تصویر صحرایی از بخش‌های غنی از مگنتیت - آپاتیت، مگنتیت و غنی از آپاتیت در کانسنگ توده‌ای از منطقه گزستان.

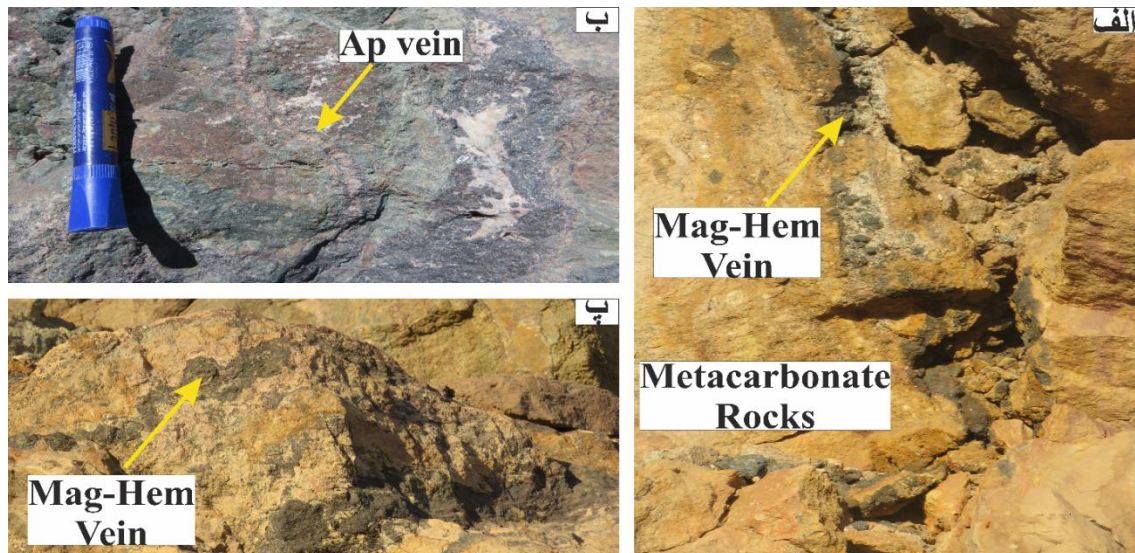
#### ۴-۲-۳- ساخت و بافت رگه-رگچه‌ای

آنچه که به عنوان این نوع ساخت و بافت در منطقه فلززائی بافق وجود دارد شامل انواع رگه-رگچه-های مگنتیت، آپاتیت، و هماتیت است که بعضاً با کلسیت و کوارتز همراهی می‌شوند. این فرم از کانه‌زائی به طور محدود در منطقه فلززائی بافق مشاهده می‌شود. در معدن اسفوردی این شکل کانه-زایی به صورت رگه‌های مگنتیت، آپاتیت، کوارتز و کلسیت در داخل سنگ‌های متاسوماتیتی تزریق شده است (شکل ۴-۱۰ الف، ب). بر اساس مطالعات (رجب زاده و همکاران، ۱۳۹۳)، این نوع کانه‌زایی در بخش‌های کم عیار منطقه اسفوردی قابل مشاهده است. بر اساس شواهد صحرایی کانه‌زایی رگه-

رگچه‌ای در منطقه لکه‌سیاه حامل مگنتیت و مگنتیت هماتیته شده است که درون سنگ‌های متاکربنات دیده می‌شود (شکل ۴-۱۱ الف). در منطقه گزستان، رگه و رگچه‌های آپاتیت و مگنتیت-کوارتز-کلسیت ± آپاتیت در داخل متاسوماتیت‌ها و حتی کانسنگ‌های توده‌ای مگنتیت - آپاتیت دیده می‌شود (شکل ۴-۱۱ ب، پ).



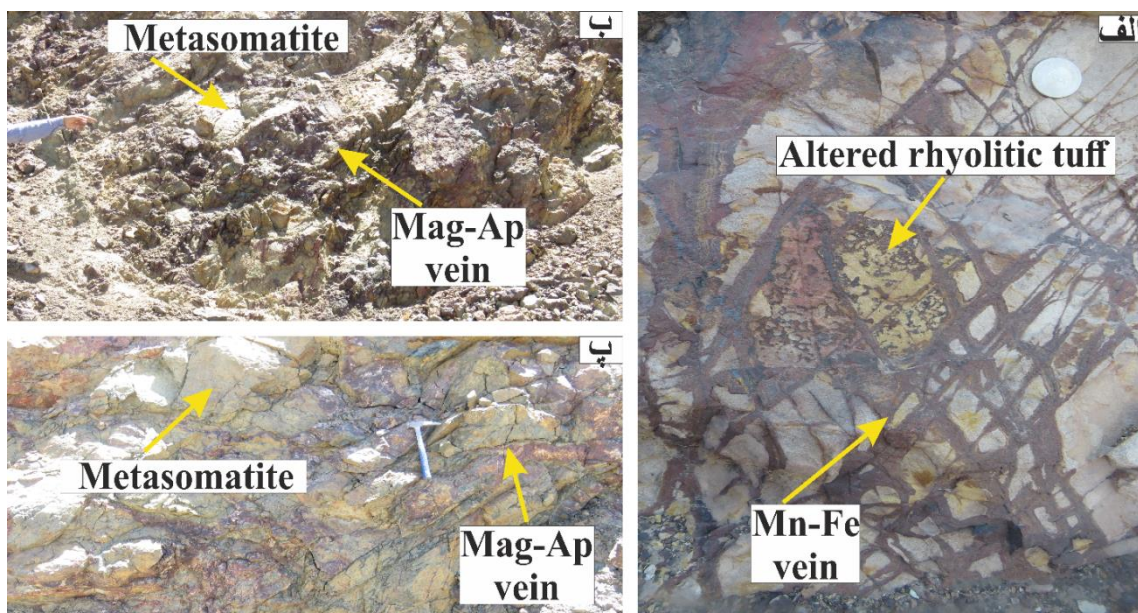
شکل ۴-۱۰: تصویری از کاننه‌زایی رگه-رگچه‌ای آپاتیت و مگنتیت در داخل سنگ‌های متاسوماتیتی در معدن اسفوردی



شکل ۴-۱۱: الف) تصویر صحرایی از کاننه‌زایی مگنتیت و مگنتیت هماتیته شده که به شکل رگه-رگچه‌ای در سنگ-های متاکربنات منطقه لکه‌سیاه مشاهده می‌شود، ب) تصویری از کاننه‌زایی رگه-رگچه‌ای آپاتیت در متاسوماتیت‌های منطقه گزستان، پ) تصویر صحرایی از کاننه‌زایی رگه-رگچه‌ای مگنتیت+کوارتز+کلسیت در منطقه گزستان در داخل کانسنگ توده‌ای

#### ۴-۲-۴- ساخت و بافت داربستی

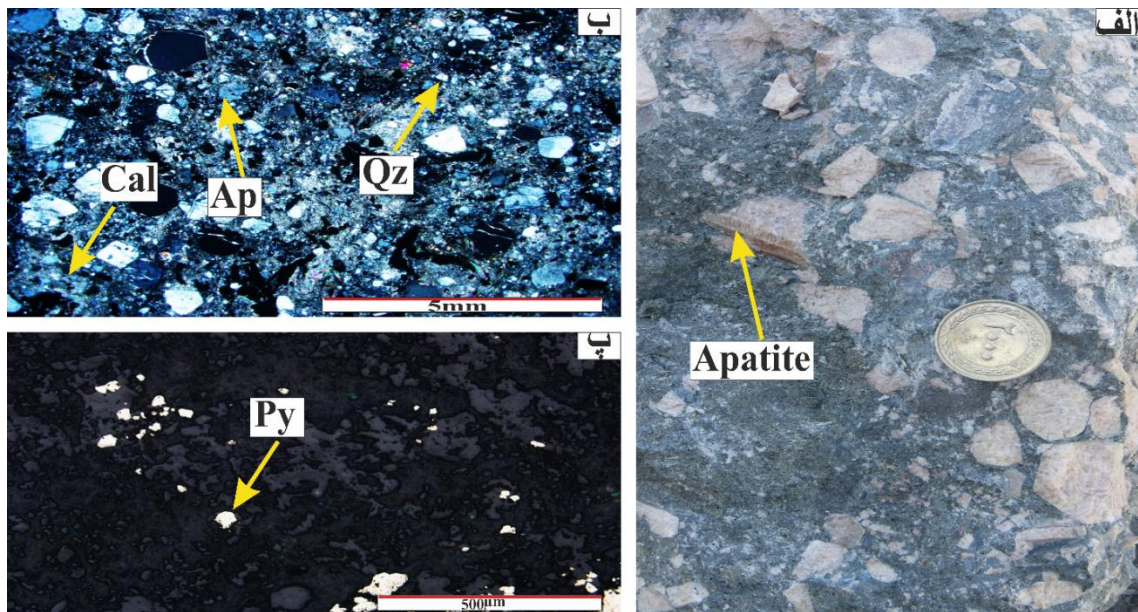
یکی دیگر از شکل‌های کانه‌زایی در منطقه فلززائی بافق، رگه- رگچه‌های نامنظم (Stockwork) می- باشد. در اثر ورود محلول گرمابی فلزدار به داخل شکستگی‌های سنگ‌های میزبان، کانی‌های مگنتیت، آپاتیت، پیرولوسیت، کوارتز و کلسیت در فضاهای خالی شکستگی‌های نامنظم رشد کرده و ساخت و بافت داربستی را تشکیل داده‌اند. در معدن متروکه منگنز ناریگان، رگه و رگچه‌های اکسیدهای منگنز و آهن در توف‌های ریولیتی میزبان در جهات متعددی دیده می‌شود و ساخت و بافت داربستی را تشکیل داده است (شکل ۴-۱۲ الف). در مناطق اسفوردی و گزستان سنگ‌های میزبان در نتیجه عملکرد سیالات گرمابی بشدت دگرسان شده و توسط رگه و رگچه‌های اکسیدهای آهن، آپاتیت، کلسیت و کوارتز در جهات مختلف قطع شده‌اند (شکل ۴-۱۲ ب و پ). دگرسان شدن شدید سنگ‌های میزبان و تشکیل رگه و رگچه‌های نامنظم در داخل آن‌ها می‌تواند در اثر انفجار ناشی از محلول‌های فوق بحرانی و همچنین تنش‌های تکتونیکی ناشی شود. دگرسانی شدید چهره اولیه سنگ را محو کرده و شناسایی سنگ اولیه را مشکل می‌نماید.



شکل ۴-۱۲: الف) تزریق رگه و رگچه‌های نامنظم اکسیدهای منگنز و آهن به درون سنگ میزبان ریولیتی در معدن متروکه منگنز زریگان، ساختار داربستی از رگه‌های مگنتیت، آپاتیت به همراه کلسیت و کوارتز در متاسوماتیت‌های کانسار گزستان، پ) ساختار داربستی از رگه‌های مگنتیت، آپاتیت به همراه کلسیت و کوارتز در متاسوماتیت‌های کانسار اسفوردی.

#### ۴-۲-۵- ساخت و بافت دانه پراکنده

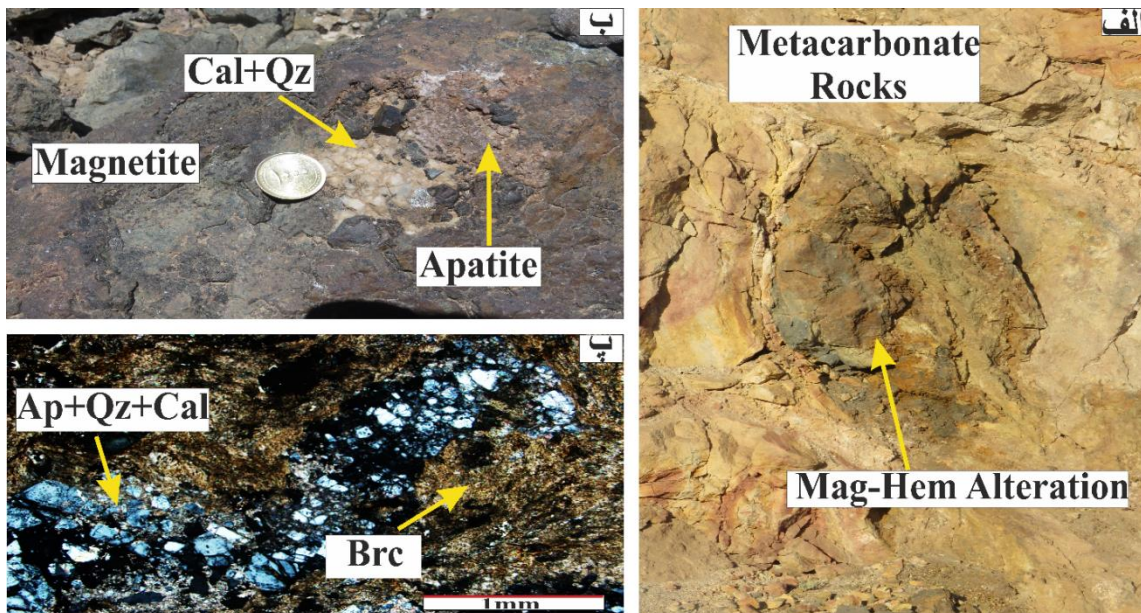
این فرم از کانه‌زایی شامل دانه‌های پراکنده مگنتیت و آپاتیت در داخل سنگ‌های متاسوماتیتی میزبان است. در معدن چغارت، کانه‌زایی دانه‌پراکنده به صورت بلورهای منفرد آپاتیت در متن سنگ‌های سبز (متاسوماتیت‌ها) نمایان است (شکل ۴-۱۳ الف). بر اساس مطالعات میکروسکوپی، این نوع کانه‌زایی در منطقه اسفوردی نیز به صورت بلورهای پراکنده آپاتیت در سنگ‌های متاسوماتیتی میزبان به چشم می‌خورد (شکل ۴-۱۴ ب). شواهد کانه‌نگاری از مناطق چغارت و گزستان بیانگر کانه‌زایی دانه پراکنده پیریت و کالکوپیریت در متن سنگ و کانسنگ مگنتیتی می‌باشد (شکل ۴-۱۴ پ). با توجه به غالب بودن مگنتیت در منطقه و کم بودن پیریت به نظر می‌رسد که نخست مگنتیت شکل گرفته و پس از آن پیریت تشکیل شده است. از این رو، بلورهای پیریت هم داخل مگنتیت و هم در اطراف آن دیده می‌شوند.



شکل ۴-۱۳: الف) تصویر نمونه دستی از کانه‌زایی آپاتیت به صورت دانه‌پراکنده در متاسوماتیت‌های معدن چغارت. ب) تصویر میکروسکوپی از بافت دانه پراکنده آپاتیت در متاسوماتیت‌های اسفوردی، پ) تصویر میکروسکوپی از حضور کانی پیریت به صورت دانه پراکنده در کانسنگ مگنتیتی و متاسوماتیت‌های معدن چغارت.

#### ۴-۲-۶- ساخت و بافت پرکننده فضای بین قطعات و حفرات

شکل دیگری از کانه‌زایی که در منطقه معدنی بافق بر اساس پیمایش‌های صحرایی مشاهده گردید، کانه‌زایی به شکل پرشدگی حفرات و فضاهای بین قطعات سنگ می‌باشد. در منطقه لکه‌سیاه این شکل از کانه‌زایی به صورت پرشدگی فضاهای خالی متاکربنات‌ها توسط مگنتیت و هماتیت دیده می‌شود (شکل ۴-۱۴ الف). در منطقه گزستان حفرات کانسنگ‌های غنی از مگنتیت توسط اجتماعی از مگنتیت، آپاتیت، کلسیت و کوارتز پر شده است (شکل ۴-۱۴ ب). مطالعات کانه‌نگاری در منطقه گزستان نیز وجود این نوع بافت را تایید می‌کند به این صورت که بلورهای کوارتز و آپاتیت فضای بین بلورهای مگنتیت مرحله پیشین را پر کرده است (شکل ۴-۱۴ پ).

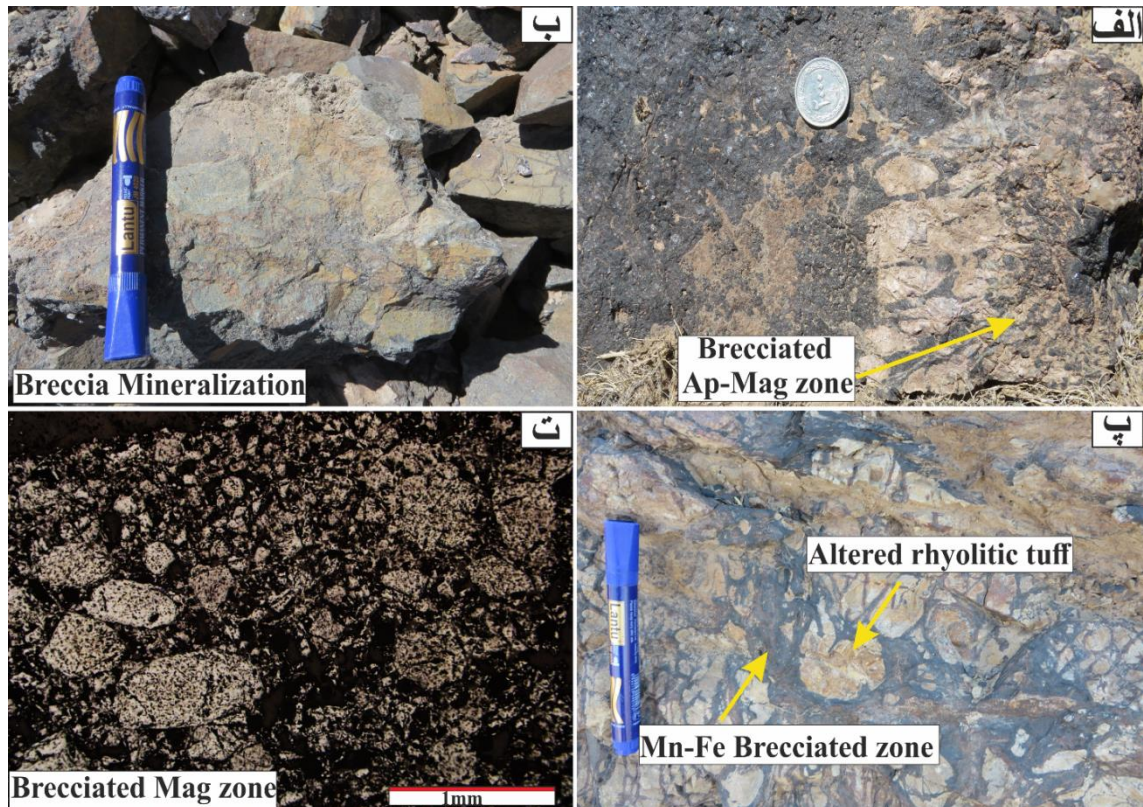


شکل ۴-۱۴: الف) مگنتیت و هماتیت که حفره متاکربنات‌ها را در منطقه لکه‌سیاه پر کرده‌اند، ب) اجتماعی از بلورهای مگنتیت، آپاتیت، کلسیت و کوارتز که فضاهای خالی کانسنگ مگنتیتی در منطقه گزستان را پر کرده است، پ) تصوی میکروسکوپی از بلورهای آپاتیت، کلسیت و کوارتز که فضای بین بروسیت را پر کرده است.

#### ۴-۲-۷- ساخت و بافت برشی

بر اساس شواهد صحرایی این نوع کانه‌زایی بیشتر در منطقه گزستان مشاهده می‌شود. سیمای کانه-زایی برشی را قطعات آتشفشانی زاویه‌دار تشکیل می‌دهند که فضای بین قطعات برشی توسط اکسیدهای آهن و آپاتیت پر شده است (شکل ۴-۱۵، الف، ب). در مناطق دیگر به خصوص اطراف معدن نارینگان نیز این شکل از کانه‌زایی به صورت پرشدگی اکسیدهای منگنز و آهن در فضای بین

قطعات برشی مشاهده می‌شود (شکل ۴-۱۵ پ). مطالعه مقاطع نازک صیقلی منطقه گزستان نیز کانه-زایی مگنتیت به صورت بافت برشی را نشان می‌دهد (شکل ۴-۱۵ ت).



شکل ۴-۱۵: الف. ب) کانه‌زایی فرم برشی در منطقه گزستان، فضای بین قطعات زاویه‌دار متاسوماتیت‌ها به وسیله اکسیدهای آهن (آپاتیت) پر شده است. پ) کانه‌زایی برشی اکسیدهای منگنز و آهن در معدن متروکه منگنز نارینگان.

#### ۴-۳- کانی‌شناسی و توالی پاراژنزی کانی‌ها در کانسارهای منطقه بافق

اکسیدهای آهن، اکسیدهای منگنز و آپاتیت، مهم‌ترین کانی‌های معدنی در کانسنگ‌های منطقه معدنی بافق به حساب می‌آیند. نوع و درصد این کانی‌ها بسته به تیپ کانسار متفاوت است. حتی در مقیاس یک کانسار نیز تغییرات قابل توجهی در نسبت کانی‌ها (به ویژه مگنتیت و آپاتیت) مشاهده می‌شود. کانه‌ها شامل اکسیدهای آهن (مگنتیت، هماتیت، اسپیکیولاریت، گوتیت، و لیمونیت)، اکسیدهای منگنز (پیرولوسیت و پسیلوملان)، آپاتیت، پیریت و کالکوپیریت می‌باشد. هورنبلند، اپسومیت ترمولیت، اکتینولیت، بیوتیت، کلریت، اپیدوت، گارنت، کوارتز، و کلسیت کانه‌ها را در



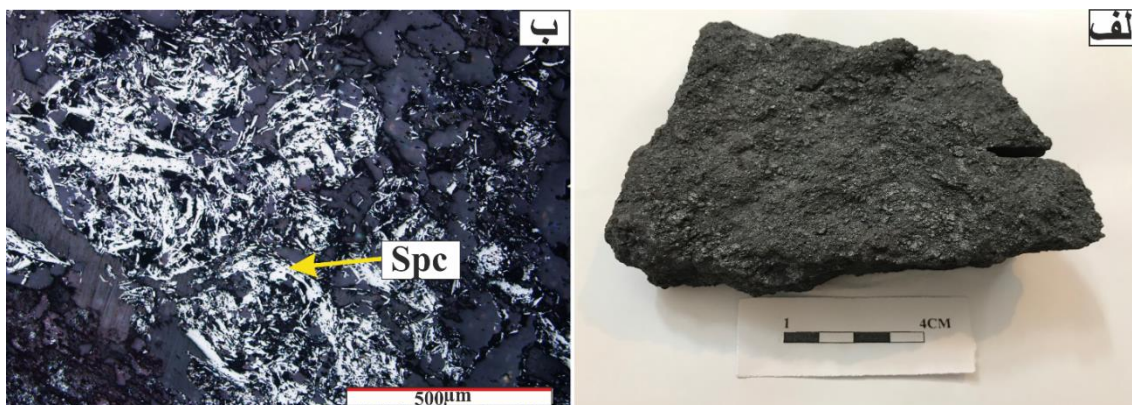
کانه‌زائی‌های منطقه بافق همراهی می‌نمایند. در ادامه، به بررسی کانی‌شناسی، و توالی پاراژنزی انواع کانه‌زائی‌ها پرداخته می‌شود.

#### ۴-۳-۱- کانه‌زائی آهن - منگنز نواری

سری ریزو در منطقه فلززائی بافق، لایه و نوارهایی از اکسیدهای منگنز، آهن و سیلیس‌های آهن‌دار (ژاسپیلیت) را دارا می‌باشد. بر پایه مشاهدات صحرایی پژوهش حاضر، این تیپ کانه‌زائی در بخش‌های غربی و جنوب‌غربی معدن آپاتیت اسفوردی وجود دارد. این نوارها عموماً در واحدهای متادولومیت و گدازه و توف‌های بازالتی مشاهده می‌گردد. نمونه‌های با شماره‌های 13، BS-TP-1 جهت مطالعات کانه‌نگاری از افق‌های کانه‌زائی برداشت شده است. پیرولوسیت، مگنتیت‌های هماتیتی شده، اسپکیولاریت، هماتیت، گوتیت، پسیلوملان، و ژاسپیلیت ترکیب کانی‌شناسی غالب آن‌ها را تشکیل می‌دهد. ضخامت لایه‌های منگنز و آهن از حد چند سانتی‌متر تا بیش از ۱ متر متغیر است. همچنین اپسومیت به صورت ثانویه در قسمت‌های سطحی نوارهای آهن- منگنز و سیلیس‌های آهن‌دار که به وسیله گدازه‌های بازالتی میزبانی می‌شوند، تشکیل شده‌اند.

#### اسپکیولاریت و هماتیت:

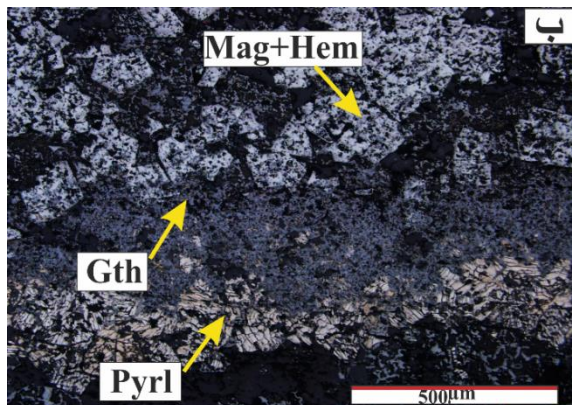
اصلی‌ترین و فراوان‌ترین کانی‌های موجود در کنسارهای آهن‌نواری منطقه مورد مطالعه اسپکیولاریت و هماتیت است. بر اساس مطالعات میکروسکوپی، اسپکیولاریت به صورت تیغک‌های نازک و متراکم بخش عمده نمونه را تشکیل می‌دهد که بوسیله هماتیت همراهی می‌شود (شکل ۴-۱۶ الف، ب). هماتیت به صورت اولیه تحت شرایط فوگاسیته بالای اکسیژن از مذاب‌های اکسید آهن تشکیل می‌گردد. به باور (Haynes et al., 1995) برای تشکیل هماتیت در قسمت‌های فوقانی کنسار، حضور اکسیژن ضروری است، به عبارت دیگر برای شکل‌گیری هماتیت، باید فوگاسیته اکسیژن افزایش پیدا کند. برای این امر یک منبع خارجی لازم است تا این میزان اکسیژن را فراهم کند و محتمل‌ترین منبع اکسیژن، آب‌های جوی است که در اثر چرخش در قسمت بالای کنسار باعث اکسیده شدن قسمت فوقانی کنسار شده و سبب تشکیل هماتیت می‌شود.



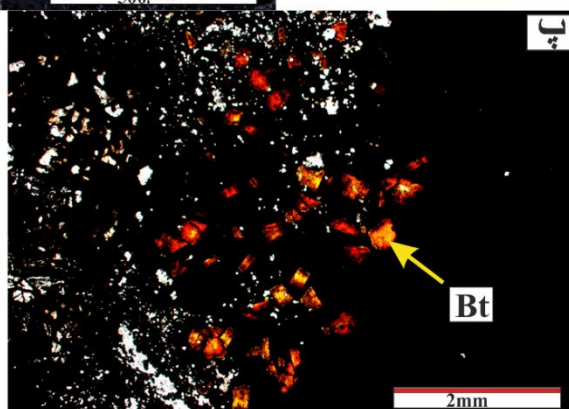
شکل ۴-۱۶: الف) نمونه دستی از کانسنگ غنی از اسپکیولاریت و هماتیت از منطقه اسفوردی، ب) تصویر میکروسکوپی از لامینه غنی از اسپکیولاریت در میان باندهای ژاسپیلیت.

### پیرولوزیت:

پیرولوزیت یکی از کانی‌های عمومی منگنز است و به عنوان یکی از کانی‌های معدنی آن نیز محسوب می‌شود. در منطقه فلززائی بافق، کانه‌زائی منگنز - آهن به صورت افق‌های متعددی در توالی رسوبی - آتشفشانی ریزو (به ویژه با متادولومیت‌ها) مشاهده می‌گردد. بر اساس مطالعات میکروسکوپی پیرولوزیت به صورت بلورهای ریز و درشت به صورت نوارهای متناوب با مگنتیت، مگنتیت هماتیته شده، و گوتیت مشاهده می‌شود (شکل ۴-۱۷ الف، ب). بر اساس مطالعات پتروگرافی در این نمونه در اطراف پیرولوزیت‌ها کانی بیوتیت به صورت خود شکل و نواری در اطراف آن‌ها ایجاد شده‌اند. تشکیل بیوتیت‌های غنی از آهن به دلیل وجود سیال آبگون غنی از آهن و پتاسیم بوده است (شکل ۴-۱۷ پ).



الف

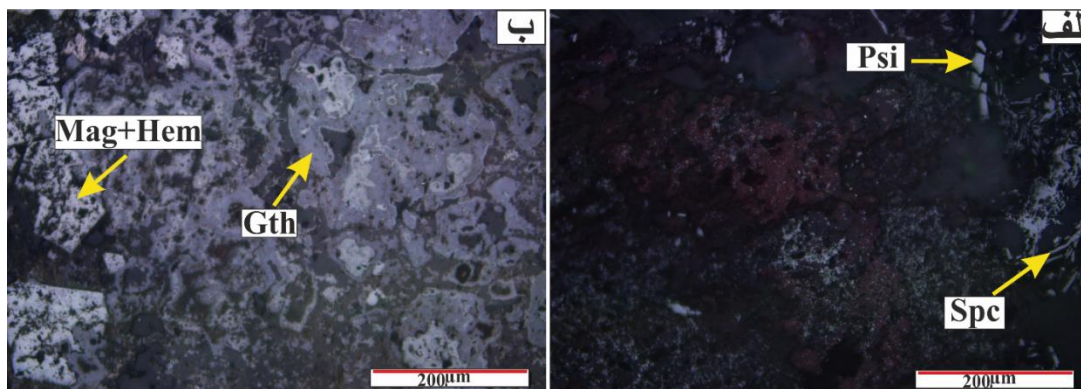


شکل ۴-۱۷: الف) تصویر نمونه دستی کانسنگ منگنز - آهن که از منطقه اسفوردی برداشت شده است، ب) تصویر میکروسکوپی از نوار پیرولوژیت در میان باندهای مگنتیت، و مگنتیت‌های هماتیتهای و گوتیتی شده. پ) تصویر میکروسکوپی از حضور نوارهای غنی از بیوتیت در نمونه‌های مورد مطالعه

### گوتیت و پسیلوملان:

اکسیدهای منگنز (پسیلوملان) با بافت قلوهای و به رنگ سفید تا خاکستری به همراه اسپکیولاریت و گوتیت در کانسنگ‌های نواری منگنز- آهن دیده می‌شود (شکل ۴-۱۸ الف).

گوتیت دارای فرمول شیمیایی  $FeOOH$  می‌باشد و در سیستم ارترومبیک متبلور می‌شود. دارای رنگ زرد متمایل به قهوه‌ای است، شدت بازتابش ضعیفی دارد و سختی صیقلی آن کمتر از هماتیت است. گوتیت یک کانی ثانویه است و از اولین فرآورده‌های هوازدگی در کانسارهای آهن، مس و ... است، و از هوازدگی اکسیرهای آهن (مگنتیت، هماتیت، اسپکیولاریت) و سولفیدهای مس-آهن (پیریت، کالکوپیریت و ...) به وجود می‌آید. بر پایه شواهد میکروسکوپی، گوتیت در کانسنگ‌های منگنز - آهن نواری منطقه اسفوردی، محصول دگرسانی مگنتیت و هماتیت است (شکل ۴-۱۸ ب).



شکل ۴-۱۸: الف) همیافتی پسیلوملان با اسپکیولاریت و گوتیت در کانسنگ‌های منگنز - آهن نواری از منطقه اسفوردی، ب) جانشینی مگنتیت و هماتیت به وسیله گوتیت.

### توالی پاراژنزی کانسنگ‌های آهن-منگنز نواری:

در کانسنگ‌های آهن- منگنز نواری که به صورت متناوب با سیلیس‌های آهن دار مشاهده می‌گردند، ابتدا کانی‌های ژاسپر، مگنتیت، اکسیدهای منگنز نظیر پیرولوسیت و بیوتیت‌های آهن دار به صورت اولیه و همزمان تشکیل شده است. در نتیجه عملکرد سیالات گرمابی تاخیری کانی‌هایی نظیر الیژیست، پسیلوملان، کوارتز و کلسیت تشکیل شده‌اند که به صورت رگه و رگچه‌هایی لایه بندی کانی- های مرحله‌ی اول را قطع نموده‌اند. تحت تاثیر فرایند هوازدگی و سوپرژن کانی‌هایی نظیر هماتیت، گوتیت و لیمونیت تشکیل شده است

جدول ۴-۱: توالی پاراژنزی کانه‌زایی آهن نواری منطقه معدنی بافق

Stage		Volcano-sedimentary (Syngenetic & Diagenetic)	Epigenetic hydrothermal	Supergen & Oxidation
Minerals				
Ore	Magnetite	●		
	Specularite		●	
	Hematite			●
	Pyrolusite	●		●
	Limonite			●
	Gothite			●
	Psilomelane		●	
Gangue	Quartz		●	
	Calcite		●	
	Chlorite		●	
	Biotite	●		
	Epsomite			●
	Jasper	●		
Texture	Banded	●		
	Replacement			●
	Vein & Veinlet		●	●
				●
	Massive			●

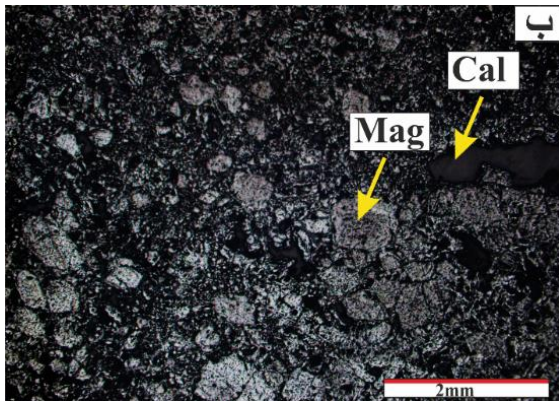
#### ۴-۳-۲- کانه‌زائی آهن - آپاتیت ماگمایی - گرمابی

کانه‌زائی‌های آهن - آپاتیت با منشاء ماگمایی - گرمابی مهمترین رخداد معدنی در منطقه فلززائی بافق می‌باشد. کانه‌ها شامل اکسیدهای آهن (مگنتیت، هماتیت، اسپکیولاریت، گوتیت، و لیمونیت)، آپاتیت، پیریت و کالکوپیریت می‌باشد. هورنبلند، ترمولیت، اکتینولیت، بیوتیت، کلریت، اپیدوت، گارنت، کوارتز، و کلسیت کانه‌ها را در کانه‌زائی‌های منطقه بافق همراهی می‌نمایند. مگنتیت و آپاتیت از کانی‌های اصلی سازنده‌ی این کانسارها به حساب می‌آیند و تغییرات قابل توجهی در نسبت این دو در کانسارهای منطقه بافق مشاهده می‌شود. بر پایه درصدهای مگنتیت و آپاتیت (عیارهای آهن و فسفر) هر کانسار به نوبه خود به بخش‌های غنی از مگنتیت، مگنتیت-آپاتیت و غنی از آپاتیت بلوک‌بندی می‌شود.

#### مگنتیت:

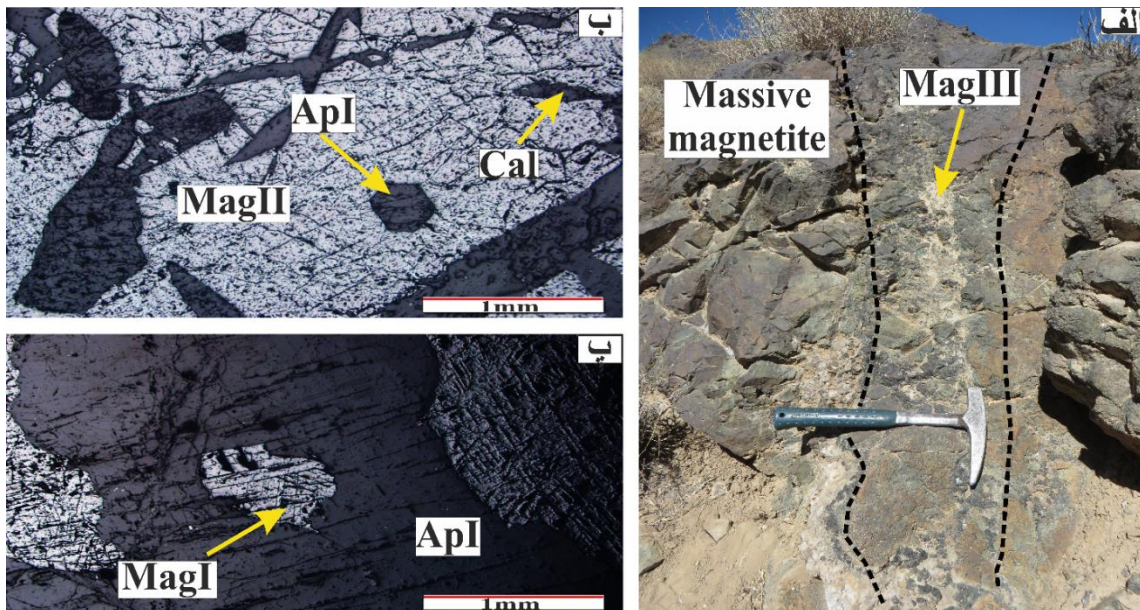
در منطقه معدنی بافق فراوان‌ترین کانه موجود مگنتیت است که به شکل‌های توده‌ای، رگه-رگچه‌ای، پرکننده حفرات، دانه‌پراکنده و برشی قابل رویت است. کانی مگنتیت در کانسارهای منطقه بافق به اشکال مختلف خودشکل، نیمه‌خودشکل و بی‌شکل مشاهده می‌شود. تصویر شماره (۴-۱۹ الف)، نمونه دستی از بخش کانسنگ توده‌ای غنی از مگنتیت در کانسار لکه‌سیاه را نشان می‌دهد و نمونه BL-TP-09 برای مطالعات کانه‌نگاری از این بخش انتخاب شده است. بلورهای مگنتیت در این نمونه به شدت خرد شده و بافت کاتاکلاستی را نشان می‌دهند (شکل ۴-۱۹ ب). کانه‌های مگنتیت و آپاتیت به شکل دندریتی دیده می‌شوند که این خود نشانه هم‌رشدی مگنتیت و آپاتیت است که درون متاسوماتیت‌ها روی داده است. بافت دندریتی در کانسارهای نوع کایرونا معمول است و آن را یکی از ویژگی‌های

کانسارهای آهن ماگمایی می‌دانند (Nystroem and Henriquez, 1994)

**الف**

شکل ۴-۱۹: الف) تصویر نمونه دستی کانسنگ مگنتیتی از منطقه لکه‌سیاه، ب) تصویر میکروسکوپی از شکل توده‌ای مگنتیت که تکتونیزه شده و بافت کاتاکلاستی نشان می‌دهد.

بر پایه مطالعات میکروسکوپی سه نسل مگنتیت در منطقه بافق شناسایی گردید. نسل اول شامل بلورهای دانه ریز تا متوسط مگنتیت است که به صورت ادخال در داخل آپاتیت‌های درشت بلور قرار دارند، که بیانگر تقدم تشکیل این نسل از مگنتیت‌ها نسبت به آپاتیت‌های نسل اول است (شکل ۴-۲۰ پ). نسل دوم مگنتیت‌های درشت بلوری هستند که فضای بین بلورهای آپاتیت نسل اول را پر می‌کند و به صورت غالب در منطقه دیده می‌شود (شکل ۴-۲۰ ب). نسل سوم مگنتیت آنهایی هستند که به صورت رگه-رگچه‌های مگنتیت+کوارتز+کلسیت±آپاتیت متاسوماتیت‌ها و کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت نسل‌های پیشین را قطع می‌نمایند. مگنتیت‌های این نسل خودشکل و درشت بلور هستند. با توجه به بزرگی بلورهای مگنتیت نسل سوم، از آنها مقطع میکروسکوپی تهیه نشده است، و اثبات وجود آنها بر پایه مشاهدات صحرایی می‌باشد (شکل ۴-۲۰ الف).

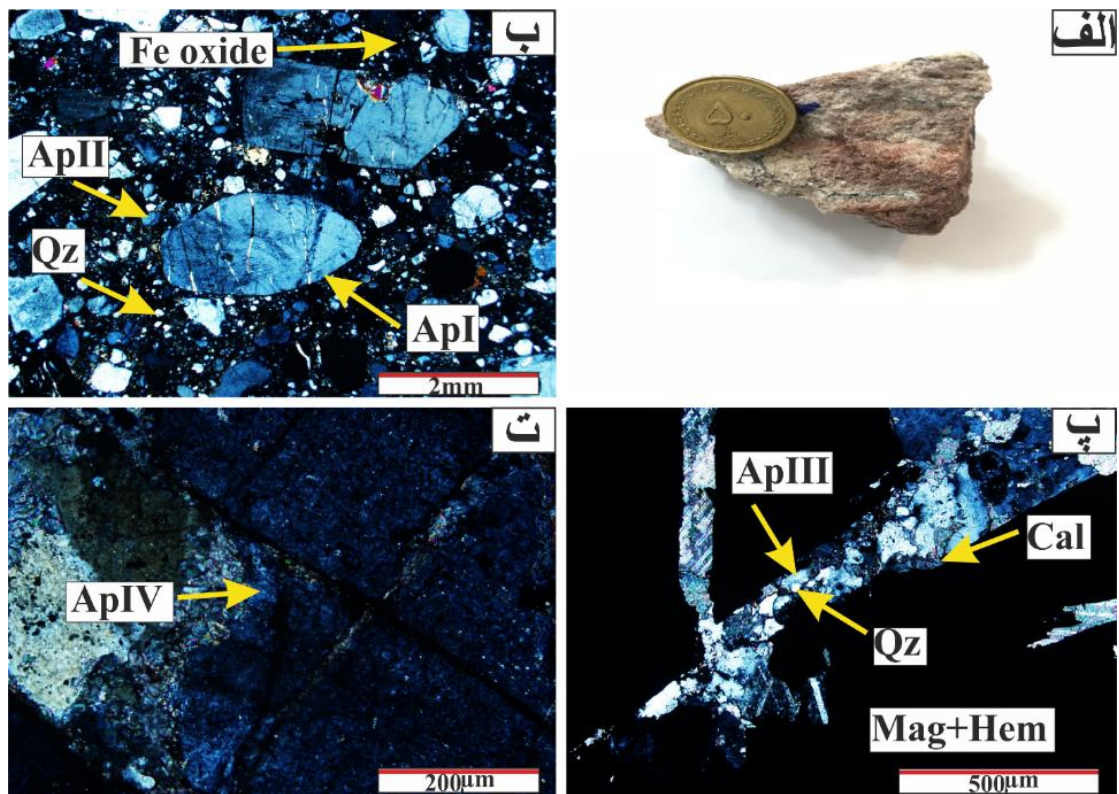


شکل ۴-۲۰: الف) تصویر صحرایی از نسل سوم کانه‌زایی مگنتیت که به صورت رگه‌هایی مگنتیتی درشت بلور در منطقه گزستان حضور دارد، ب) تصویر میکروسکوپی از نسل دوم کانه‌زایی مگنتیت که فضای بین بلورهای آپاتیت نسل اول را پر کرده است، پ) تصویر میکروسکوپی از کانه‌زایی نسل اول مگنتیت که به صورت ادخال در بلورهای آپاتیت نسل اول حضور دارد.

### آپاتیت:

آپاتیت یکی از کانی‌های غالب در کنسارهای آهن-آپاتیت منطقه بافق است که بیشتر همراه با فاز اکسیدهای آهن عمدتاً مگنتیت و مگنتیت‌های هماتیتی شده و کانی‌های باطله مشاهده می‌شود (شکل ۴-۲۱ الف). چندین نمونه جهت مطالعات کانی‌شناسی از مناطق معدنی اسفوردی، لکه‌سیاه، چغارت و گزستان جمع‌آوری شده است. مطالعه توالی پاراژنزی کانی‌ها وجود چهار نسل زایش آپاتیت را در منطقه فلززایی بافق نشان می‌دهد. آپاتیت‌های نسل اول به صورت بلورهای دانه درشت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار تظاهر دارند و در مواردی دارای ادخال‌هایی از مگنتیت‌های نسل اول هستند (شکل ۴-۲۱ ب). اندازه بلورهای این نسل از آپاتیت‌ها از یک میلی‌متر تا بیش از دو سانتی‌متر متغیر است. آپاتیت‌های نسل دوم به همراه مگنتیت و بندرت کانی‌های سیلیکاتی به صورت یک فاز تاخیری فضای بین درشت بلورهای آپاتیت نسل اول را پر کرده‌اند (شکل ۴-۲۱ ب). این نسل از آپاتیت‌ها دانه ریز تا متوسط هستند. نسل سوم آپاتیت که به صورت ریز بلور در منطقه گزستان مشاهده می‌شود و همراه با رگه‌هایی از کوارتز، کلسیت و مگنتیت یافت می‌شوند. همچنین در بعضی از مناطق نسل

سوم آپاتیت باعث قطع شدگی کلسیت و مگنتیت‌های هماتیته شده می‌شوند (شکل ۴-۲۱ پ). در نهایت نسل چهارم آپاتیت که بیشتر در منطقه اسفوردی مشاهده می‌شود آپاتیت‌هایی هستند که به صورت هاله‌های کوچک در حاشیه بلورهای درشت که دچار انحلال شده و در حال تبدیل به کریستال‌های نوظهور آپاتیت هستند، مشاهده می‌شود (شکل ۴-۲۱ ت). مطالعات (ایرانمنش و همکاران، ۱۳۹۸)، نیز وجود ۴ نسل آپاتیت در منطقه فلززایی بافق را تایید می‌کنند



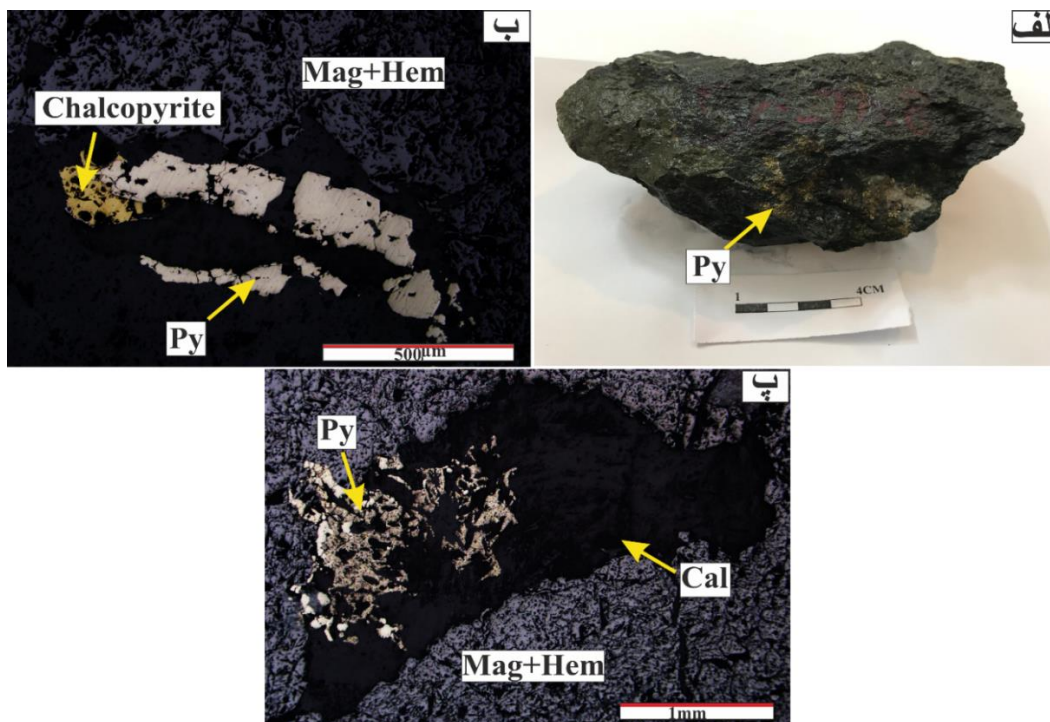
شکل ۴-۲۱: الف) تصویر نمونه دستی کانسنگ آپاتیته که از منطقه اسفوردی برداشت شده است، ب) تصویر میکروسکوپی از حضور بلورهای دانه درشت آپاتیت نسل اول که فضای بین آن‌ها را بلورهای دانه ریز تا متوسط آپاتیت نسل دوم به همراه کوارتز و اکسیدهای آهن پر کرده است، پ) تصویر میکروسکوپی از نسل سوم آپاتیت که به صورت رگه-رگه کانسنگ‌های مگنتیت - آپاتیت مرحله‌های قبلی را قطع کرده‌اند. تصویر میکروسکوپی از نسل چهارم آپاتیت است که حاصل انحلال و جانشینی درشت بلورهای آپاتیت مراحل قبلی هستند.

#### کانی‌های سولفیدی (پیریت و کالکوپیریت):

در منطقه فلززایی بافق، به همراه کانه‌زایی اکسیدهای آهن - آپاتیت (به‌ویژه در بخش‌های غنی از مگنتیت) در حد مقادیر جزئی کانی‌های سولفیدی (پیریت و کالکوپیریت) مشاهده می‌شود. بر پایه شواهد صحرایی، همیافتی پیریت و کالکوپیریت با کانی‌های اکسید آهن و آپاتیت در مناطق معدنی



چغارت و گزستان رویت شده است (شکل ۴-۲۲ الف)، و نمونه‌های با شماره سریال (BC-TP-12) و (BG-TP-5) به ترتیب از کانسارهای چغارت و گزستان انتخاب شده‌اند. به باور (Hitzman et al., 1992)، حضور سولفید مس و آهن در کانسارهای غنی از مگنتیت متداول است. پیریت در همه ذخایر مگنتیتی، مراحل نهایی فعالیت گرمابی را نشان می‌دهد (Marschik et al., 2008). پیریت تحت شرایط سطحی هوازدگی به اکسید و هیدروکسیدهای آهن دگرسان می‌شود. پیریت فراوان‌ترین کانی سولفیدی در نمونه‌های مورد مطالعه می‌باشد که همراه با کالکوپیریت به صورت پراکنده در زمینه کانسنگ مگنتیتی و فضای بین بلورهای مگنتیت مشاهده می‌شود (شکل ۴-۲۲ ب). علاوه بر این، کانی‌های سولفیدی به مقدار جزئی به شکل ادخال در مگنتیت نیز دیده می‌شوند.

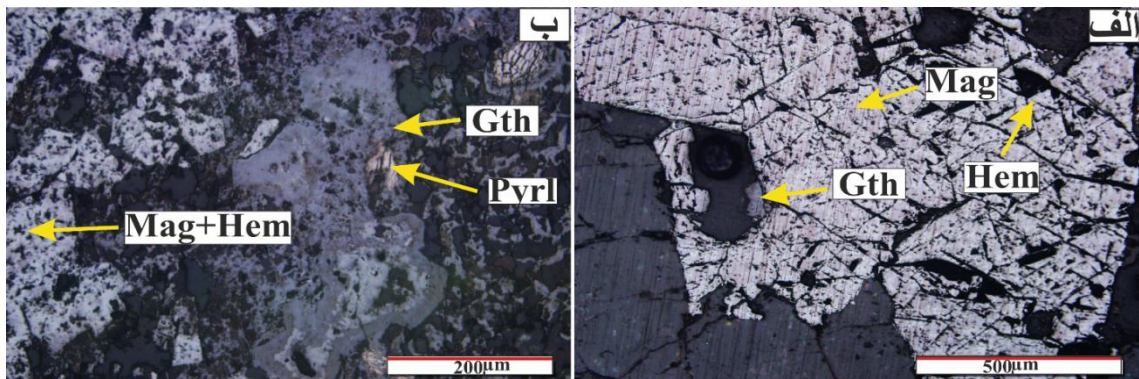


شکل ۴-۲۲: الف) تصویر نمونه دستی از کانه‌زایی اکسید آهنی - سولفیدی که از منطقه چغارت برداشت شده است، ب) تصویر میکروسکوپی از حضور پیریت و کالکوپیریت در فضای بین مگنتیت‌های هماتیتی شده. پ) تصویر میکروسکوپی از حضور کانی پیریت که به شکل ادخال در داخل کلسیت قرار گرفته است.

### هماتیت و گوتیت:

هماتیت و گوتیت همانند آنچه که در بخش کانه‌زایی منگنز - آهن نواری گفته شد در کانه‌زایی آهن - آپاتیت ماگمایی - گرمابی نیز مشاهده می‌شود. در کانسنگ‌های منطقه بافق، کانه اصلی اکسیدی

مگنتیت است، و کانی‌های هماتیت و گوتیت به شکل ثانویه و در نتیجه فرایندهای برون‌زاد (سوپرژن) در امتداد شکستگی‌ها، سطوح رخ و حواشی بلورهای مگنتیت‌ها و به‌ندرت سولفیدها وجود دارند (شکل ۴-۲۳). در مواردی نیز مگنتیت به طور کامل به هماتیت تبدیل شده است. هماتیت به‌صورت ثانویه فرآورده تبدیل بلورهای مگنتیت به هماتیت بر اثر فرایند مارتیتی شدن است. فراوانی هماتیت‌ها احتمالاً به دلیل فعالیت‌های گرمایی یا دگرسانی صورت گرفته است.



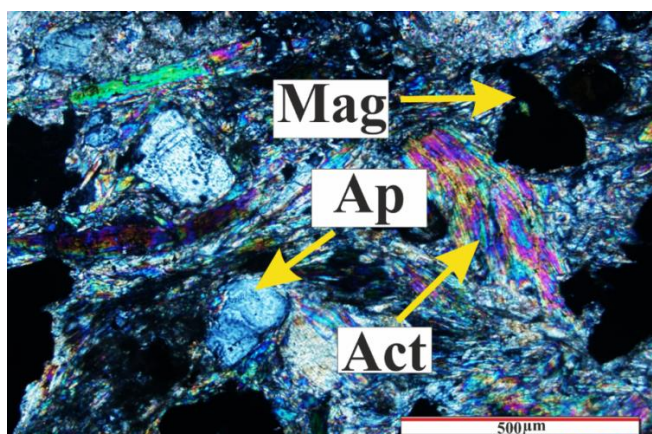
شکل ۴-۲۳: تصویر میکروسکوپی که بیانگر هماتیستی شدن بلورهای مگنتیت در کانه‌زایی آهن-آپاتیت (ماگمایی-گرمایی) می‌باشد.

**کانی‌های باطله:** فراوان‌ترین کانی‌های باطله در کانسنگ‌های منطقه بافق شامل ترمولیت، اکتینولیت، بروسیت، گارنت، اپیدوت، کلریت، کلسیت، کوارتز و دولومیت است (در فصل سوم به تفصیل به معرفی آن‌ها پرداختیم).

#### ترمولیت - اکتینولیت:

در کانسنگ‌های آهن-آپاتیت منطقه بافق، ترمولیت و اکتینولیت (به‌ویژه اکتینولیت) فراوان‌ترین کانی سیلیکاتی هستند، که به صورت بلورهای درشت و انبوهه‌های شعاعی-رشته‌ای ریز دانه مشاهده می‌شوند و در مواردی با درجات مختلف به کلریت دگرسان شده‌اند. این کانی به صورت بلورهای نیمه خودشکل تا بی‌شکل می‌باشد. بر اساس مطالعات پتروگرافی اکتینولیت در قسمت‌های غنی از آهن و آپاتیت به صورت دندریتی دیده می‌شود (شکل ۴-۲۴). وجود بلورهای دندریتی شکل به طول ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر در مجاورت کانی‌های مگنتیت و آپاتیت منشأ ماگمایی-گرمایی (متاسوماتیکی) این

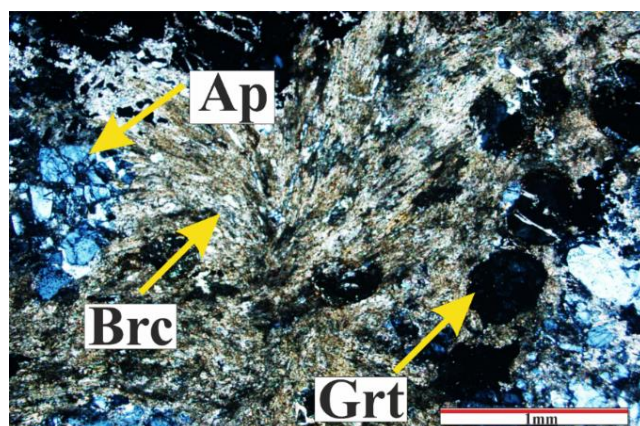
کانسارها را تایید می نماید. اگر اکتینولیت به صورت اگرگات های شعاعی و اشکال سوزنی و دندریتی و یا به صورت جریانیه به همراه مگنتیت دیده شود، بیانگر رشد همزمان آنها است. بافت دندریتی در کانسارهای نوع کایرونا معمول است، و آن را یکی از ویژگی های کانسارهای آهن ماگمایی می دانند (Lupulescu et al., 2017).



شکل ۴-۲۴: تصویر میکروسکوپی از اکتینولیت های دندریتی که فضای بین مگنتیت و آپاتیت ها را پر کرده است.

#### بروسیت:

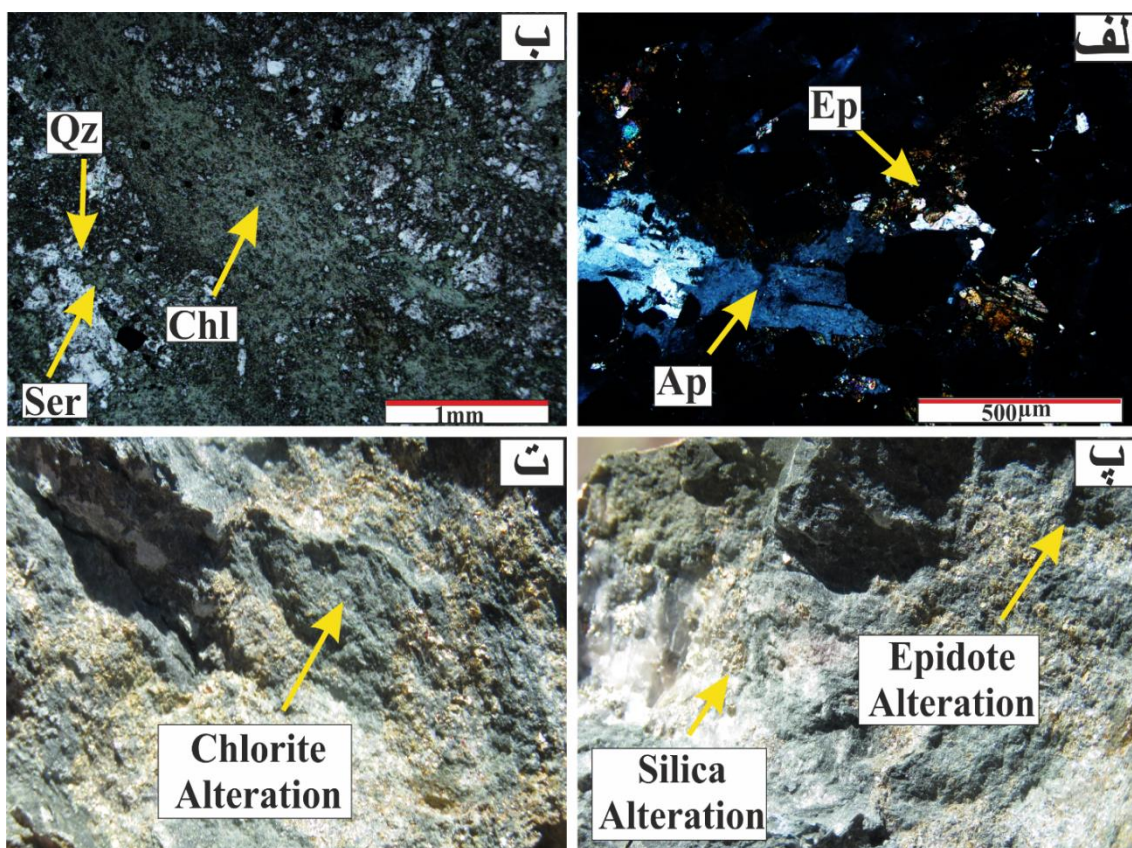
بروسیت با فرمول شیمیایی  $Mg(OH)_2$  یکی دیگر از کانی های باطله ای است که در مناطق مورد مطالعه و به ویژه در اسفوردی دیده می شود. بر اساس شواهد میکروسکوپی این کانی به صورت رشته ای متراکم در فضاهای خالی میان بلورهای آپاتیت (به ویژه آپاتیت های نسل دوم) قرار گرفته است، و در مواردی با گارنت همراهی می شود (شکل ۴-۲۵).



شکل ۴-۲۵: تصویر میکروسکوپی از کانی بروسیت که به صورت رشته ای در فضای بین بلورهای آپاتیت رشد کرده، و با گارنت همراهی می شود.

## اپیدوت و کلریت:

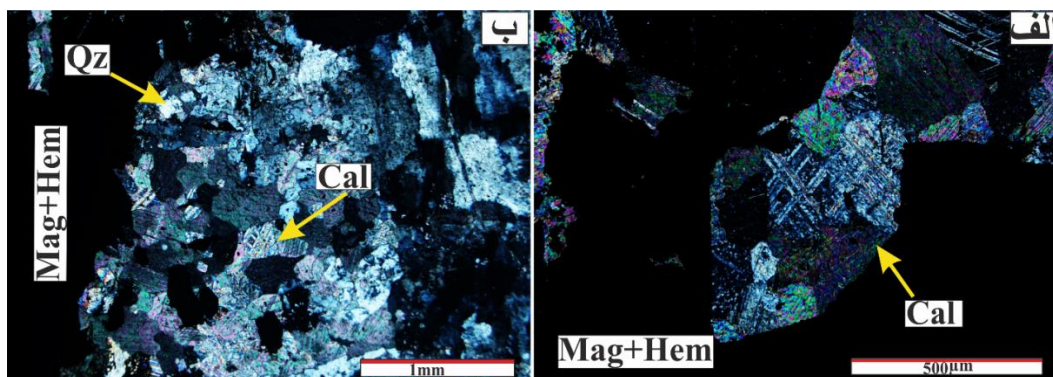
اپیدوت و کلریت از دیگر کانی‌های باطله است که به همراه مگنتیت، آپاتیت، کلسیت، کوارتز، سریسیت و ... در کانسارهای منطقه بافق دیده می‌شود. اپیدوت و کلریت از دگرسانی کانی‌های آهن و منیزیم‌دار (پیروکسن‌ها، آمفیبول‌ها، بیوتیت، گارنت و ...) به وجود می‌آیند (شکل‌های ۴-۲۶ الف، ب). کانی‌های باطله مذکور به صورت دگرسانی نیز در مناطق چهارگانه قابل رویت می‌باشد (شکل‌های ۴-۲۶ پ، ت). لازم به ذکر است که اپیدوت و کلریت در مقایسه با دیگر کانی‌های باطله از گسترش زیادی در کانسارهای منطقه بافق برخوردار نیستند.



شکل ۴-۲۶: الف) تصویر میکروسکوپی از اپیدوت در کنار آپاتیت از کانسار اسفوردی، ب) حضور کلریت به همراه کوارتز و سریسیت پ) تصویر صحرایی از وجود دگرسانی‌های سیلیسی و اپیدوتی در منطقه مورد مطالعه. ت) تصویر صحرایی از دگرسانی کلریتی در منطقه مورد مطالعه

## کلسیت و کوارتز:

بر اساس مطالعات کانه‌نگاری کلسیت به صورت بی شکل تا خود شکل دیده می‌شود. این کانی به صورت رگه-رگچه‌ای کانسنگ‌های مگنتیت و آپاتیت را قطع می‌نماید، و در مواردی هم به صورت پر کننده فضای بین آن‌ها دیده می‌شود (شکل‌های ۴-۲۷ الف، ب). کوارتز دیگر کانی باطله است که کلسیت را همراهی می‌کند. این کانی به صورت بی شکل تا نیمه‌شکل در اکثر مقاطع میکروسکوپی حضور دارد. لازم به ذکر است که کلسیت و کوارتز با نسل‌های تاخیری مگنتیت و آپاتیت نیز همراهی می‌شوند.



شکل ۴-۲۷: الف) کانی کلسیت که بلورهای مگنتیت را قطع کرده است، ب) حضور کلسیت و کوارتز در فضای بین بلورهای مگنتیت.

## توالی پاراژنزی آهن - آپاتیت ماگمایی:

### مرحله فعالیت‌های ماگمایی - گرمابی

مرحله اول: تشکیل مگنتیت‌های نسل یک می‌باشد که به صورت ادخال در درشت بلورهایی از آپاتیت نسل یک قابل مشاهده است. این گروه از آپاتیت‌های نسل یک دارای فراوانی نسبتاً بالایی در منطقه می‌باشند.

مرحله دوم: شکل‌گیری همزمان کریستال‌های مگنتیت - آپاتیت نسل دوم می‌باشد که به صورت مایعاتی از آهن - آپاتیت فضای بین مگنتیت - آپاتیت‌های نسل اول را پر می‌کنند. مگنتیت - آپاتیت - های نسل دوم نسبت به سایر مراحل کانی‌سازی گسترده‌تر هستند. به عبارتی فاز غالب کانه‌زایی آهن - آپاتیت در منطقه می‌باشند. پیریت و کالکوپیریت نیز همراه با مگنتیت و آپاتیت نسل اول مشاهده

می‌شوند. این کانی‌ها هم به صورت ادخال در مگنتیت و هم به صورت تاخیری در فضای بی بلورهای مگنتیت- آپاتیت نسل دوم مشاهده می‌شوند.

مرحله سوم: نسل سوم بیشتر رگه‌های آپاتیتی و مگنتیتی هستند که نسل‌های قبل را قطع می‌کنند و نسبت به فازهای قبلی گسترش ندارند. به نظر می‌رسد این نسل از کانه‌زایی آپاتیت و مگنتیت حاصل انحلال و کانی‌سازی مجدد نسل‌های یک و دو آپاتیت بوده که به صورت رگه به این سیستم وارد و فضاهای خالی و درز و شکستگی‌ها را تحت تاثیر قرار داده است.

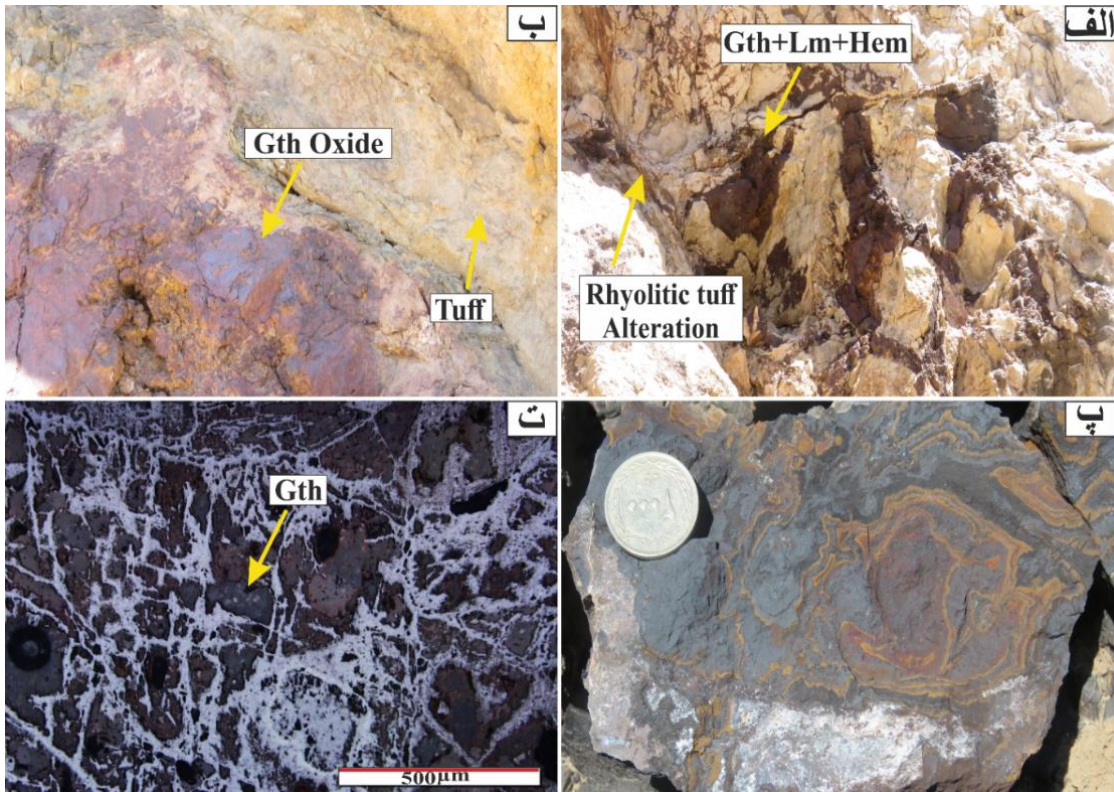
مرحله چهارم: نسل چهارم آپاتیت‌های که به صورت هاله‌های کوچک در حاشیه بلورهای درشت که دچار انحلال شده و در حال تبدیل به کریستال‌های نوظهور آپاتیت هستند، مشاهده می‌شود. این نسل از آپاتیت‌ها در منطقه اسفوردی قابل مشاهده هستند.

#### **مرحله فعالیت‌های سوپرژن و هوازگی**

در ادامه تحت تاثیر فرایندهای سوپرژن و هوازگی کانی‌های هماتیت، گوتیت و لیمونیت شکل گرفته‌اند.

#### **کانه‌زایی ثانویه (سوپرژن)**

در مطالعه صحرایی مشاهده گردید که در بخش‌هایی از کانسارهای گزستان، لکه‌سیاه و چغارت کانه‌زایی ثانویه به صورت سطحی و آغشتگی‌هایی از هماتیت، گوتیت، و لیمونیت است (شکل ۴-۲۸ الف، ب، پ). در مطالعات میکروسکوپی از زون سوپرژن تنوع کانی‌شناسی زیادی به چشم نمی‌خورد و عمده‌ترین کانی‌های مشاهده به شکل گوتیت، لیمونیت و اکسیدهای منگنز (پیرولوزیت، و ...) می‌باشد (شکل ۴-۲۸ ت).



شکل ۴-۲۸: الف) تصویر صحرایی از آغستگی گوتیت، لیمونیت و هماتیت در سنگ میزبان توف ریولیتی در منطقه گزستان. ب) تصویر صحرایی اکسید گوتیت در توف‌های منطقه گزستان. پ) تصویر صحرایی از زون سوپرژن در معدن چغارت. ت) تصویر میکروسکوپی از حضور گوتیت در زون سوپرژن در منطقه گزستان

جدول ۴-۲: توالی پاراژنری کاندهزایی آهن- آپاتیت منطقه معدنی بافق

Stage Minerals		Magmatic- Hydrothermal				Supergen
		Stage1	Stage2	Stage3	Stage4	
Ore	Magnetite1	—————				
	Apatite1	—————				
	Magnetite2		—————			
	Apatite2		—————			
	Magnetite3			—————		
	Apatite3			—————		
	Apatite4				—————	
	ChalcoPyrite		-----			
	Pyrite		-----			
	Specularite			—————	-----	
	Hematite			—————	-----	
	Gothite					—————
	Limonite					—————
	Mn-oxide					—————
Gangue	Quartz		-----	—————	-----	
	Calcite		-----	—————		-----
	Chlorite	-----	—————	—————		
	Actinolite	-----	—————	-----	-----	
	Brucite		-----	-----		
	Epidot	-----	—————	—————		
	Muscovite		—————	—————	-----	
Structure & Texture	Massive	—————	—————			—————
	Replacement				—————	—————
	vein (veinlet)			—————	-----	—————
	Desseminated	-----				



فصل پنجم

زمین شیمی سنگ کل

## ۵-۱- مقدمه

چگونگی توزیع و پراکندگی عناصر مختلف در واحدهای سنگی هر منطقه و تشخیص ارتباط و وابستگی این عناصر با یکدیگر یکی از مهم‌ترین جنبه‌هایی است که اصولاً همیشه در مطالعات ژئوشیمی مد نظر قرار می‌گیرد و با استفاده از این روابط تا حدودی می‌توان به محیط و فرایندهای موثر در تشکیل سنگ و کانسنگ‌ها پی‌برد (Barnes, 1997). بر این اساس، داده‌های ژئوشیمیایی و تجزیه و تحلیل تغییرات موجود در آن‌ها می‌تواند ما را در مطالعه شرایطی که در پیدایش و تکوین نمونه‌های سنگی مورد مطالعه دخیل بوده‌اند، یاری دهد. لذا در این فصل با توجه به این نکته مهم که ژئوشیمی یکی از ابزارهای مهم در پی بردن به نحوه تکامل سنگ‌ها است، سعی گردیده تا با استفاده از نتایج به دست آمده از تجزیه نمونه‌های سنگ کل و کانسنگ‌های منطقه مورد مطالعه، تفسیر کامل‌تری از نوع سنگ‌ها و نیز ترکیب شیمیایی آن‌ها صورت پذیرد تا در نهایت با تکیه بر آن‌ها بتوان ماهیت سنگ کل و کانسنگ‌ها، منشا، محیط تکتونیکی و شرایط و ویژگی‌های حاکم بر منطقه مورد مطالعه را تا حد امکان، حدس زد. در این پژوهش جهت مطالعات ژئوشیمیایی، تعداد ۱۴ نمونه سنگ کل و ۱۱ نمونه کانسنگ از منطقه مورد پژوهش تجزیه شد که در ادامه به توضیح و تفسیر نتایج آنها پرداخته می‌شود.

## ۵-۲- نمونه‌برداری و تجزیه شیمیایی نمونه‌ها

به منظور بررسی‌های ژئوشیمیایی نمونه‌های سنگ کل و کانسنگ در منطقه معدنی بافق، در مجموع ۲۵ نمونه انتخاب شده است. از این تعداد، ۲ نمونه دولومیتی، ۵ نمونه سنگ آتشفشانی، ۷ نمونه سنگ‌های آذرین درونی و ۱۱ نمونه از انواع کانسنگ‌های منطقه بوده است. نمونه‌های سنگی از مکان‌هایی انتخاب شدند که سالم، غیردگرسان شده و عاری از رگه-رگچه بودند. دولومیت‌های منطقه ریزدانه و نسبتاً همگن بوده، و روش نمونه‌برداری از آنها قطعه‌ای بوده است، و برداشت یک قطعه سنگ، معرف تمام محیط نمونه‌برداری بوده است. سنگ‌های آذرین دارای بافت متوسط تا درشت‌دانه

بوده، و نمونه‌برداری از آنها به روش لبپری انجام شده است، بدین ترتیب که در هر ایستگاه تعدادی قطعه کوچک سنگ با مقطع عرضی ۳ تا ۴ سانتی‌متر مربع برداشت شده است. برای دستیابی به نمونه معرف از مناطق کانه‌زایی، تعداد ۱۱ نمونه کانسنگ به روش لبپری از کانسنگ‌های اکسیدهای آهن، اکسیدهای آهن-آپاتیت، و آپاتیت انتخاب شده است. نمونه‌های سنگ و کانسنگ به ترتیب مراحل خردایش و آسیاب را پشت‌سر گذاشته، و برای تعیین مقادیر غلظت اکسیدهای عناصر اصلی، عناصر کمیاب و کمیاب خاکی، ابتدا در حضور کمک ذوب تترا بورات لیتیم در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد ذوب گردید. پس از سرد شدن، مذاب حاصله با اسید هیدروکلریک رقیق شستشو شده و به صورت محلول در آمده است. در نهایت، مقادیر غلظت عناصر در محلول به روش‌های طیف‌سنجی پلاسمای جفت شده القایی نشر اتمی (ICP-AES) و طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) در آزمایشگاه‌های اکی (Acme labs) کشور کانادا تجزیه شدند. نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های سنگ و کانسنگ به همراه مکان و مناطق معدنی برداشت آن‌ها در ادامه این فصل در قسمت‌های مربوطه آورده شده است.

### ۵-۳- پردازش داده‌های ژئوشیمیایی

اولین قدم برای پردازش داده‌های ژئوشیمیایی، آماده‌سازی داده‌ها می‌باشد. پس از آماده‌سازی، داده‌های ژئوشیمیایی سنگ و کانسنگ بسته به هدف تحقیق با استفاده از روش‌ها و نرم افزارهای مختلف تحلیل می‌شوند. در ادامه، به طور سلسه مراتبی مراحل تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی آورده شده است.

### ۵-۳-۱- جایگزینی داده‌های سنسورد

داده‌های سنسورد، به داده‌هایی گفته می‌شود که مقادیر آن زیر حد تشخیص و یا بالای حد تشخیص دستگاه اندازه‌گیری می‌باشد. در این مرحله باید درصد فراوانی نمونه‌ها در مورد عناصری که مقادیر سنسورد برای آن‌ها گزارش شده است، محاسبه شود. در صورتی که درصد داده‌های سنسورد برای یک متغیر (عنصر) در حد قابل قبول (کمتر از ۵۰ درصد کل داده‌ها) بود، می‌توان به روش‌های مختلف

مقادیر سنسورد را جایگزین کرد. یکی از روش‌های متداول، روش جایگزینی ساده است. در این روش، داده‌های سنسورد حد پایین (کمتر از حد پایین تشخیص دستگاه) با مقادیر ۳/۴ حد تشخیص پایینی، و داده‌های سنسورد حد بالا (بیشتر از حد بالای تشخیص دستگاه) با مقادیر ۴/۳ حد تشخیص بالایی جایگزین می‌شوند. در پژوهش حاضر، مقادیر غلظت برخی از عناصر کمیاب در نمونه‌های سنگ و کانسنگ پایین‌تر از حد تشخیص پایینی دستگاه آنالیز گزارش شده است. بنابراین مقادیر درصد فراوانی نمونه‌های دارای مقادیر سنسورد، به همراه حد پایین حساسیت دستگاه و مقدار جایگزینی عناصر، برای نمونه‌های سنگ و کانسنگ‌های منطقه بافق به ترتیب در جدول‌های (۵-۱) و (۵-۲) آورده شده است.

جدول ۵-۱: تعداد و درصد فراوانی نمونه‌های دارای مقادیر سنسورد و مقدار جایگزینی برای پاره‌ای از عناصر در ۱۴ نمونه سنگ منطقه مورد مطالعه.

مقدار جایگزینی	حد پایین حساسیت دستگاه (گرم در تن)	درصد فراوانی	تعداد داده‌های سنسورد	عنصر
0/75	1	35.71	5	Be
0/075	0.1	21.42	3	Cs
0/375	0.5	7.14	1	Ga
15	20	71.42	10	Ni
0/75	1	21.42	3	Sc
075	1	21.42	3	Sn
0/075	0.1	14.28	2	Ta
0/075	0.1	21.42	3	V
0/375	0.5	21.42	3	W

جدول ۵-۲: تعداد و درصد فراوانی نمونه‌های دارای مقادیر سنسورد و مقدار جایگزینی برای پاره‌ای از عناصر در ۱۱ نمونه کانسنگ منطقه مورد مطالعه.

مقدار جایگزینی	حد پایین حساسیت دستگاه (گرم در تن)	درصد فراوانی	تعداد داده‌های سنسورد	عنصر
0/75	1	18.18	2	Be
0/075	0.1	90.9	10	Cs
0/375	0.5	36.36	4	Ga
0/075	0.1	81.81	9	Hf
15	20	18.18	2	Ni
0/075	0.1	9.09	1	Ta
0/375	0.5	45.45	5	W

### ۵-۳-۲- ارزیابی دقت و صحت داده‌های ژئوشیمیایی

همواره در آنالیزهای آزمایشگاهی خطا وجود دارد و هیچ‌گاه مقدار آن به صفر نمی‌رسد. بنابراین بحث خطای دستگاهی یا تجزیه مطرح می‌شود. خطای تجزیه عبارت است از اختلاف یا انحراف مقدار اندازه‌گیری شده از مقدار حقیقی آن است که به دو گروه خطای تصادفی (دقت) و خطای سیستماتیک (صحت) تقسیم می‌شود. در این پژوهش، روش‌های کنترل کیفی داده‌های آزمایشگاهی شامل ارزیابی صحت داده‌ها با استفاده از نمونه‌های استاندارد و توخالی (Blank)، و ارزیابی دقت با استفاده از نمونه‌های تکراری می‌باشد، که در ادامه هر یک از روش‌های مذکور توصیف می‌شوند.

الف) بررسی صحت داده‌های ژئوشیمیایی به کمک نمونه‌های توخالی: صحت عبارت است از توانایی نزدیک شدن به مقدار واقعی (حقیقی) کمیت مورد اندازه‌گیری است. یکی از روش‌هایی که برای ارزیابی صحت داده‌های ژئوشیمیایی وجود دارد، استفاده از نمونه‌های توخالی (Blank) است. این نمونه‌ها می‌تواند از آب مقطر، سیلیس خالص و یا کلسیت خالص باشد که در این پژوهش از آب مقطر استفاده شده است. نمونه توخالی، پنج بار در طول تجزیه نمونه‌های منطقه مورد مطالعه آنالیز شده است و نتایج آن‌ها در جدول (۳-۵) آورده شده است. از آنجائی که تغییراتی برای غلظت عناصر در نمونه‌های توخالی وجود ندارد، بنابراین میزان خطا در اندازه‌گیری غلظت عناصر با استفاده از روش‌های دستگاهی مورد استفاده حداقل بوده است، به عبارتی صحت اندازه‌گیری‌ها با استفاده از نمونه‌های توخالی تایید می‌شود.

جدول ۳-۵: نتایج تجزیه نمونه‌های توخالی برای ارزیابی صحت روش‌های دستگاهی در تجزیه نمونه‌های سنگ و کانسنگ منطقه.

عنصر	BLK	BLK	BLK	BLK	BLK
SiO <sub>2</sub>	0.03	0.04	0.02	0.01	0.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04
MgO	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
CaO	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Na <sub>2</sub> O	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
K <sub>2</sub> O	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
TiO <sub>2</sub>	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
MnO	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
Ba	1	<1	<1	<1	3
Ni	<20	<20	<20	<20	<20
Sc	<1	<1	<1	<1	<1
Be	<1	<1	<1	<1	<1
Co	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
Cs	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Ga	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Hf	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Nb	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1
Rb	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Sn	<1	<1	<1	<1	<1
Sr	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Ta	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Th	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
U	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
V	<8	<8	<8	<8	<8
W	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Zr	<0.1	0.3	<0.1	0.2	<0.1
Y	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
La	<0.1	<0.1	0.2	0.1	<0.1
Ce	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Pr	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
Nd	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3
Sm	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Eu	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02

<b>Gd</b>	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
<b>Tb</b>	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
<b>Dy</b>	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
<b>Ho</b>	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.04
<b>Er</b>	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03
<b>Tm</b>	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.02
<b>Yb</b>	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
<b>Lu</b>	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

### ب) بررسی صحت داده‌های ژئوشیمیایی به کمک نمونه‌های استاندارد:

یکی از روش‌های کنترل کیفی در آزمایشگاه‌ها استفاده از نمونه‌های استاندارد است. نمونه‌های استاندارد توسط چندین آزمایشگاه مرجع و معتبر بین‌المللی تجزیه می‌شوند و مقادیر غلظت عناصر در آنها از قبل مشخص می‌باشد. این نمونه‌ها به همراه نتایج آنها از آزمایشگاه‌های مرجع خریداری می‌شوند و برای کالیبره کردن دستگاه‌های آنالیز و ارزیابی صحت داده‌های ژئوشیمیایی بکار گرفته می‌شوند. نمونه استاندارد که در آزمایش‌های پژوهش حاضر استفاده شده است نمونه‌ای با شماره سریال STD-SO-19 می‌باشد که در طول تجزیه نمونه‌های منطقه مورد مطالعه، چندین بار مورد آنالیز قرار گرفته است، و نتایج حاصل از آن در جدول (۴-۵) آورده شده است. بررسی نتایج این جدول بیان از کمترین تغییرپذیری در داده‌های نمونه استاندارد برای عناصر مختلف و صحت بالای آزمایش‌ها می‌باشد.

جدول ۴-۵: نتایج تجزیه مکرر نمونه استاندارد برای ارزیابی صحت روش‌های دستگاهی در تجزیه نمونه‌های سنگ و کانسنگ منطقه.

عنصر	STD SO-19	STD SO-19	STD SO-19	STD SO-19	STD SO-19	STD SO-19	STD SO-19	STD SO-19	STD SO-19	STD SO-19
SiO <sub>2</sub>	60.49	60.75	60.49	60.40	60.20	59.81	60.65	60.33	60.47	60.60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.93	13.88	13.99	14.02	14.05	14.20	13.89	13.99	13.94	13.84
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.45	7.35	7.43	7.45	7.50	7.57	7.46	7.54	7.48	7.56
MgO	2.91	2.90	2.92	2.92	2.93	2.98	2.90	2.93	2.91	2.90
CaO	5.93	5.92	5.96	5.96	6.01	6.07	5.93	5.99	5.96	5.92
Na <sub>2</sub> O	4.06	4.00	4.00	4.03	4.07	4.10	3.98	3.98	4.03	3.99
K <sub>2</sub> O	1.30	1.29	1.29	1.28	1.30	1.33	1.26	1.28	1.28	1.28
TiO <sub>2</sub>	0.70	0.69	0.70	0.70	0.70	0.72	0.70	0.71	0.70	0.70
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.31	0.31	0.31	0.32	0.35	0.32	0.32	0.33	0.31	0.29
MnO	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.493	0.497	0.499	0.499	0.495	0.503	0.493	0.497	0.506	0.503
Ba	513	489	495	483	479	459	462	454	435	464
Ni	459	462	465	469	468	471	469	478	471	472
Sc	26	25	26	26	26	26	26	26	26	26
Be	20	20	19	19	14	22	11	10	25	16
Co	26.0	25.1	25.8	25.7	24.1	23.5	22.1	24.0	24.4	24.5
Cs	4.8	4.8	4.6	4.6	4.2	4.6	3.7	4.5	4.1	4.1
Ga	17.4	18.1	17.4	17.2	16.4	16.2	16.7	16.5	16.9	16.7
Hf	3.0	3.2	3.3	3.1	3.3	3.4	2.8	3.4	3.1	3.0
Nb	72.9	71.8	72.7	72.0	67.9	68.5	65.8	64.2	70.2	67.3
Rb	21.4	21.5	21.0	20.7	20.4	20.9	19.0	19.4	19.7	19.1
Sn	19	19	19	19	18	18	18	17	17	23
Sr	340.8	331.6	326.3	331.6	315.8	312.9	298.9	305.9	294.3	311.9
Ta	4.7	4.8	4.8	4.6	4.6	4.5	4.1	4.2	4.4	4.4
Th	13.5	12.6	14.3	13.8	12.5	13.3	13.6	12.6	14.0	13.5
U	20.4	19.8	21.2	20.1	19.3	18.7	19.5	19.9	19.8	18.9
V	158	155	161	163	160	165	167	162	160	162
W	9.5	10.5	11.1	9.1	9.5	9.5	9.6	9.5	9.8	9.2
Zr	121.5	114.9	114.8	115.4	112.3	112.3	105.7	107.9	109.8	107.4
Y	36.7	35.7	36.9	37.4	35.6	36.0	34.7	35.7	35.1	36.2
La	77.9	74.5	74.9	74.0	69.9	69.5	68.5	71.3	73.6	74.7
Ce	170.3	158.1	162.6	163.2	149.1	155.1	153.8	155.2	165.5	161.1
Pr	20.32	19.29	19.81	19.57	18.69	18.72	18.67	18.65	19.56	19.58
Nd	81.1	74.8	76.6	75.8	74.5	73.1	72.5	72.3	77.4	75.1
Sm	13.76	13.13	13.35	12.66	12.99	13.15	12.75	12.11	13.10	12.87
Eu	3.80	3.53	3.78	3.69	3.64	3.53	3.27	3.51	3.78	3.59
Gd	10.93	10.64	10.83	10.35	10.19	10.08	10.03	9.81	10.17	10.36
Tb	1.44	1.42	1.43	1.43	1.35	1.35	1.34	1.33	1.36	1.36
Dy	7.71	7.51	7.52	7.54	7.18	7.08	6.87	7.25	7.61	7.55
Ho	1.42	1.41	1.40	1.36	1.29	1.27	1.33	1.36	1.37	1.37
Er	4.02	3.80	3.95	3.77	3.79	3.86	3.67	3.88	3.88	4.02
Tm	0.57	0.54	0.54	0.51	0.54	0.55	0.52	0.53	0.48	0.53
Yb	3.58	3.67	3.58	3.41	3.41	3.22	3.22	3.30	3.30	3.45



### پ) ارزیابی دقت داده‌های ژئوشیمیایی با استفاده از نمونه‌های تکراری:

دقت عبارت است از توانایی تکرار آزمایش با نتایج مشابه است. برای ارزیابی میزان دقت روش‌های دستگاهی در تجزیه نمونه‌های پژوهش حاضر، نمونه‌های با شماره سریال BE-G-4 (از منطقه بافق)، MG-14 ، 6959-10 ، و STD-SO-19 (مربوط به آزمایشگاه) در طول آزمایش نمونه‌ها دو مرتبه تجزیه شدند. مقادیر غلظت عناصر در نمونه‌های اصلی و تکراری معادل آن و درصد خطای محاسبه شده برای اکسید عناصر اصلی، عناصر فرعی، کمیاب و کمیاب خاکی به ترتیب در جدول‌های (۵-۵) و (۶-۵) داده شده است. ارزیابی میزان دقت بر پایه نتایج نمونه‌های تکراری با استفاده از فرمول (۱) صورت می‌پذیرد. در این فرمول  $X_1$  مقدار غلظت در نمونه اصلی،  $X_2$  مقدار غلظت در نمونه تکراری و  $n$  تعداد جفت نمونه‌های تکراری می‌باشد (حسینی پاک، ۱۳۸۹). معمولاً درصد خطای کمتر از ۱۰ درصد برای بسیاری از روش‌های تجزیه دستگاهی قابل قبول است. بر پایه داده‌های جدول‌های (۵-۵) و (۶-۵)، در پژوهش حاضر میزان درصد خطا برای عناصر اصلی کمتر از ۱ درصد و برای عناصر فرعی و کمیاب کمتر از ۱۰ درصد محاسبه شده است. بنابراین داده‌های ژئوشیمیایی این تحقیق از اعتبار بسیار خوبی برای انجام مطالعات و تعبیر و تفسیرهای ژئوشیمیایی برخوردار هستند. ذکر این نکته ضروری است که نمونه‌هایی که مقدار غلظت عناصر در آنها از ۱۰ برابر حد حساسیت کمتر است نباید برای ارزیابی خطا استفاده شوند. برای مثال مقادیر غلظت عناصر باریم و بریلیوم در نمونه BE-G-04 و مقدار فسفر در نمونه 6959-10 نزدیک به حد حساسیت دستگاه است و نباید ملاک سنجش خطای دستگاهی باشند.

$$\text{Error} = \frac{2}{n} \varepsilon \left( \frac{|x_1 - x_2|}{x_1 + x_2} \right) * 10 \quad \text{فرمول (۱)}$$

جدول ۵-۵: نتایج تجزیه جفت نمونه‌های اصلی و تکراری و درصد خطا برای اندازه‌گیری اکسید عناصر اصلی در منطقه بافق.

نمونه اصلی	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>BE-G-4</b>	6.49	0.25	84.96	0.28	3.69	0.04	0.01	0.91	1.56	0.02	0.003
<b>MG14</b>	66.36	15.62	5.64	2.03	1.41	1.81	3.16	0.69	0.08	0.04	0.011
<b>6959-10</b>	11.97	1.01	36.58	0.55	28.77	0.01	0.01	0.06	0.01	0.40	0.002
<b>STD SO</b>	60.49	13.93	7.45	2.91	5.93	4.06	1.30	0.70	0.31	0.13	0.493
نمونه تکراری											
<b>BE-G-4</b>	6.51	0.25	84.85	0.28	3.75	0.04	0.01	0.90	1.60	0.02	0.003
<b>MG14</b>	66.43	15.56	5.69	2.02	1.40	1.82	3.11	0.70	0.08	0.04	0.012
<b>6959-10</b>	11.78	1.02	36.47	0.55	29.08	0.01	0.01	0.06	0.01	0.39	0.002
<b>STD SO</b>	60.33	13.99	7.54	2.93	5.99	3.98	1.28	0.71	0.33	0.13	0.497
<b>Error</b>	0.57	0.45	0.63	0.29	1.10	0.64	0.79	0.99	2.20	0.63	2.38

جدول ۵-۶: نتایج تجزیه جفت نمونه‌های اصلی و تکراری و درصد خطا در اندازه‌گیری عناصر فرعی، کمیاب و کمیاب خاکی در منطقه بافق.

نمونه اصلی	Ba	Ni	Sc	Be	Co	Cs	Ga	Hf	Nb	Rb	Sn
<b>BE-G-4</b>	4	219	1	3	60.6	0.1	27.8	0.1	2.4	0.3	23
<b>MG14</b>	554	31	11	2	14.7	5.3	22.6	8.5	13.8	116.8	3
<b>6959-10</b>	6	28	2	2	46.3	0.1	3.9	0.2	0.7	0.1	1
<b>STD SO</b>	513	459	26	20	26.0	4.8	17.4	3.0	72.9	21.4	19
نمونه تکراری											
<b>BE-G-4</b>	4	218	1	3	61.9	0.1	26.8	0.1	2.6	0.3	22
<b>MG14</b>	571	31	11	2	14.1	5.1	21.6	8.3	14.1	118.6	3
<b>6959-10</b>	6	27	2	2	46.7	0.1	3.9	0.2	0.5	0.1	1
<b>STD SO</b>	454	478	26	10	24.0	4.5	16.5	3.4	64.2	19.4	17
<b>Error</b>	9.31	2.04	0.00	16.67	3.79	2.57	3.37	3.72	14.04	2.83	3.89

جدول ۵-۷: ادامه نتایج تجزیه جفت نمونه‌های اصلی و تکراری و درصد خطا در اندازه‌گیری عناصر فرعی، کمیاب و کمیاب خاکی در منطقه بافق.

نمونه اصلی	Sr	Ta	Th	U	V	W	Zr	Y	La	Ce	Pr
BE-G-4	26.0	0.2	5.0	2.7	1820	1.8	4.3	98.5	155.2	355.7	42.02
MG14	168.6	1.0	14.7	4.7	79	1.2	307.4	25.5	43.1	84.2	9.49
6959-10	126.9	0.1	0.2	1.4	31	26.3	4.9	15.2	42.9	48.6	4.48
STD SO	340.8	4.7	13.5	20.4	158	9.5	121.5	36.7	77.9	170.3	20.32
نمونه تکراری											
BE-G-4	27.2	0.2	5.1	2.7	1828	1.6	4.5	99.5	150.0	348.3	42.21
MG14	171.3	0.9	13.7	4.6	76	1.3	309.9	26.7	40.8	84.1	9.56
6959-10	123.6	0.1	0.2	1.6	29	26.4	5.7	15.7	42.1	49.3	4.46
STD SO	305.9	4.2	12.6	19.9	162	9.5	107.9	35.7	71.3	155.2	18.65
Error	4.88	5.44	3.98	4.49	3.37	5.04	8.08	2.90	4.90	3.23	2.55

جدول ۵-۸: ادامه نتایج تجزیه جفت نمونه‌های اصلی و تکراری و درصد خطا در اندازه‌گیری عناصر فرعی، کمیاب و کمیاب خاکی در منطقه بافق.

نمونه اصلی	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
BE-G-4	155.0	27.85	2.00	24.66	3.19	16.51	3.27	9.10	1.17	6.79	0.92
MG14	36.5	6.44	1.23	5.53	0.78	4.75	0.96	2.85	0.40	2.53	0.41
6959-10	15.4	2.59	0.77	3.02	0.43	2.29	0.44	1.13	0.13	0.71	0.09
STD SO	81.1	13.76	3.80	10.93	1.44	7.71	1.42	4.02	0.57	3.58	0.54
نمونه تکراری											
BE-G-4	159.1	28.00	2.11	25.09	3.20	17.09	3.20	9.43	1.19	6.70	0.91
MG14	34.0	6.47	1.25	5.55	0.81	4.69	0.97	2.84	0.42	2.81	0.42
6959-10	14.6	2.79	0.73	3.10	0.44	2.25	0.41	0.98	0.14	0.72	0.09
STD SO	72.3	12.11	3.51	9.81	1.33	7.25	1.36	3.88	0.53	3.30	0.52
Error	6.63	5.30	5.06	3.88	3.58	3.16	3.64	5.42	5.31	5.34	1.82

#### ۵-۴- ژئوشیمی سنگ‌های منطقه بافق

به منظور بررسی‌های ژئوشیمیایی نمونه‌های سنگ کل در منطقه مورد مطالعه، در مجموع ۱۴ نمونه انتخاب شده است. از این تعداد، ۲ نمونه دولومیت، ۵ نمونه سنگ آتشفشانی و ۷ نمونه سنگ آذرین درونی بوده است. نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های سنگ به همراه محل برداشت آن‌ها در جدول (۵-۹) آورده شده است. در این بخش، از داده‌های ژئوشیمی برای نام‌گذاری سنگ‌های آذرین، تعیین سری ماگمائی، محیط تکتونیکی تشکیل، منشاء ماگما، روند تبلور بخشی، آرایش پوسته‌ای و ... استفاده شده است.

جدول ۵-۹: مقادیر غلظت اکسیدهای عناصر اصلی (درصد وزنی)، عناصر فرعی، کمیاب و کمیاب خاکی (گرم در تن) در نمونه‌های سنگ مناطق مورد مطالعه به روش‌های ICP-AES/MS.

مکان	اسفوردی						گزستان		
آزمایشگاه	Acme labs کانادا								
نمونه‌ها	BE-G-1	BE-G-2	BE-G-8	BE-G-13	BE-G-22	BE-G-23	BG-G-10	BG-G-14	BG-G-25
نام سنگ	سینیت	بازالت	مونزوسینیت	دولومیت	توف داسیتی	دولومیت	بازالت آندزیتی	دیوریت	توف ریولیتی
SiO <sub>2</sub>	57.20	45.66	47.07	0.53	59.70	7.73	51.51	53.56	68.70
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.70	15.03	14.13	0.16	1.74	1.18	16.42	13.76	10.87
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.25	11.64	12.22	5.25	14.32	2.68	11.38	4.08	5.10
MgO	1.11	7.39	5.81	17.58	0.17	18.60	6.05	2.24	2.52
CaO	1.90	10.57	5.72	30.72	1.26	29.22	1.90	9.43	1.91
Na <sub>2</sub> O	6.10	1.51	4.07	0.12	0.99	0.04	5.45	5.05	0.13
K <sub>2</sub> O	5.90	1.60	3.48	0.01	2.95	0.56	1.25	1.04	7.12
TiO <sub>2</sub>	0.19	1.24	2.39	<0.01	1.39	0.06	1.55	0.71	0.10
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.27	0.09	0.85	0.03	0.63	0.02	0.22	0.20	0.04
MnO	0.15	0.32	0.16	0.98	0.01	0.28	0.06	0.37	0.05
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.004	0.039	0.025	0.003	0.032	0.004	0.016	0.015	0.065
LOI	2.8	4.5	3.6	44.2	16.3	39.2	4.0	9.3	3.2
Sum	99.64	99.72	99.62	99.66	99.78	99.62	99.79	99.77	99.91
C	0.12	0.48	0.64	12.32	0.06	10.65	0.25	2.22	0.48
S	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	4.14	1.69	<0.02	<0.02	<0.02
Ba	308	910	585	116	2109	95	170	138	628
Be	8	<1	3	<1	<1	<1	4	3	1
Co	1.9	35.1	39.2	2.1	0.7	6.1	14.1	5.5	3.9
Cs	1.9	3.8	4.8	<0.1	<0.1	0.5	1.4	2.9	0.3
Ga	38.3	17.5	23.7	<0.5	38.2	1.1	20.7	16.2	15.4
Hf	27.0	1.8	13.1	0.1	6.2	0.6	4.4	12.3	5.6
Nb	136.8	6.6	83.5	0.2	27.4	1.4	36.8	7.6	5.9
Ni	<20	89	108	<20	<20	<20	<20	<20	<20
Rb	205.2	37.7	107.1	0.2	22.5	21.4	38.7	34.7	90.4
Sc	<1	34	14	<1	8	2	33	12	3
Sn	11	<1	4	<1	14	<1	9	2	4
Sr	282.9	464.8	642.9	158.4	1075.5	282.9	83.7	309.9	27.1
Ta	12.6	0.3	5.6	<0.1	1.7	<0.1	1.0	0.5	0.7
Th	25.1	0.8	12.1	0.2	10.0	1.2	3.3	6.0	15.6
U	7.4	0.2	3.1	4.8	5.1	3.8	1.7	1.9	1.0
V	<8	260	135	<8	75	20	126	55	29
W	2.2	0.9	6.2	<0.5	22.0	0.8	<0.5	0.8	<0.5
Y	32.6	22.0	37.3	11.4	17.1	13.2	77.5	33.7	12.0
Zr	1238.7	70.7	623.8	2.8	224.5	20.3	198.6	618.9	165.5
La	159.1	11.6	84.5	13.0	74.5	15.4	28.6	31.5	6.1
Ce	270.9	20.9	158.6	21.6	100.2	25.3	70.4	66.0	12.1
Pr	25.39	2.47	17.73	2.23	8.65	2.77	9.85	7.40	1.53
Nd	79.6	10.8	65.6	8.1	25.9	10.8	43.5	29.4	6.1
Sm	11.22	3.02	11.69	1.62	3.38	2.02	12.56	5.80	1.54
Eu	1.66	1.14	3.09	0.32	0.70	0.60	1.69	1.59	0.28
Gd	8.54	3.86	10.11	1.66	2.71	2.22	13.77	5.90	1.79
Tb	1.20	0.66	1.40	0.25	0.41	0.36	2.37	0.94	0.31
Dy	6.71	4.13	7.90	1.49	2.57	2.17	14.77	6.03	1.85
Ho	1.15	0.90	1.42	0.27	0.65	0.42	3.03	1.23	0.44
Er	3.24	2.32	3.80	0.73	2.12	1.08	8.74	3.62	1.49

<b>Tm</b>	0.45	0.32	0.49	0.09	0.32	0.15	1.23	0.55	0.26
<b>Yb</b>	2.76	1.93	3.09	0.51	1.99	0.96	7.68	3.65	2.00
<b>Lu</b>	0.35	0.30	0.44	0.05	0.32	0.13	1.03	0.56	0.34

ادامه جدول ۵-۹: مقادیر غلظت اکسیدهای عناصر اصلی (درصد وزنی)، عناصر فرعی، کمیاب و کمیاب خاکی (گرم در تن) در نمونه‌های سنگ مناطق مورد مطالعه به روش‌های ICP-AES/MS.

مکان	لکه‌سیاه				چغارت
آزمایشگاه	Acme labs کانادا				
نمونه‌ها	BL-G-15	BL-G-16	BL-G-24	BC-G-18	BC-G-21
نام سنگ	مونزونیت	مونزوسینیت	سینیت	دیوریت	توف ریوداسیتی
<b>SiO<sub>2</sub></b>	45.45	40.18	57.81	52.87	74.70
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	15.84	15.65	18.79	0.41	12.63
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	14.37	14.84	5.67	11.47	1.83
<b>MgO</b>	3.81	6.95	1.23	17.03	0.64
<b>CaO</b>	4.76	5.28	1.72	13.97	1.07
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	4.43	3.28	5.16	0.76	6.50
<b>K<sub>2</sub>O</b>	3.82	3.55	6.02	0.04	0.43
<b>TiO<sub>2</sub></b>	2.47	3.71	0.31	0.17	0.21
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	2.20	0.56	0.20	0.02	0.02
<b>MnO</b>	0.12	0.22	0.12	0.33	0.01
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<0.002	0.003	<0.002	0.013	0.003
<b>LOI</b>	2.2	5.4	2.4	2.5	1.9
<b>Sum</b>	99.66	99.68	99.55	99.58	99.95
<b>C</b>	0.20	0.85	0.13	0.25	0.45
<b>S</b>	<0.02	0.14	<0.02	<0.02	0.02
<b>Ba</b>	1705	312	1264	21	84
<b>Be</b>	4	<1	7	3	2
<b>Co</b>	24.1	16.9	2.8	19.9	1.4
<b>Cs</b>	1.6	6.7	3.4	<0.1	0.3
<b>Ga</b>	19.6	20.9	30.0	3.8	16.1
<b>Hf</b>	8.8	6.2	21.6	2.1	6.3
<b>Nb</b>	71.9	108.7	102.7	1.1	3.2
<b>Ni</b>	<20	49	<20	46	<20
<b>Rb</b>	87.7	138.1	143.2	0.9	11.7
<b>Sc</b>	10	23	<1	37	2
<b>Sn</b>	2	2	8	13	2
<b>Sr</b>	1013.2	290.2	1132.4	15.7	52.6
<b>Ta</b>	3.9	6.0	7.5	0.2	0.5
<b>Th</b>	5.7	5.8	23.7	171.6	23.2
<b>U</b>	1.3	1.6	5.3	5.9	3.1
<b>V</b>	45	294	<8	183	14
<b>W</b>	1.1	3.1	1.4	2.2	0.7
<b>Y</b>	44.8	25.1	28.0	184.3	9.8
<b>Zr</b>	421.5	274.4	1083.7	49.4	204.0
<b>La</b>	97.8	57.6	106.7	32.5	4.1
<b>Ce</b>	204.7	105.8	172.3	119.3	8.1
<b>Pr</b>	25.43	11.26	16.06	19.44	0.99

<b>Nd</b>	104.2	43.9	51.2	89.1	3.9
<b>Sm</b>	18.42	7.88	7.70	23.18	1.00
<b>Eu</b>	6.10	2.45	2.49	2.97	0.20
<b>Gd</b>	15.36	6.95	6.15	25.86	1.07
<b>Tb</b>	1.93	0.98	0.91	4.59	0.20
<b>Dy</b>	9.60	5.41	5.28	29.93	1.26
<b>Ho</b>	1.62	1.01	1.00	6.49	0.33
<b>Er</b>	4.10	2.71	2.76	19.82	1.37
<b>Tm</b>	0.51	0.35	0.40	2.85	0.22
<b>Yb</b>	2.98	2.17	2.59	18.02	1.63
<b>Lu</b>	0.38	0.31	0.36	2.60	0.32

#### ۵-۴-۱- طبقه‌بندی شیمیایی سنگ‌ها

از داده‌های ژئوشیمیایی عناصر اصلی به منظور رده‌بندی سنگ‌ها، تهیه نمودارهای تغییرات بررسی وابستگی و عدم وابستگی سنگ‌ها با یکدیگر و تعیین محیط تکتونیکی و تکوین مجموعه‌های سنگی استفاده می‌شود (Rollinson, 1993). بر این اساس، در این بخش از پژوهش، از نتایج تجزیه شیمیایی اکسیدهای عناصر اصلی، فرعی و کمیاب جهت رده‌بندی و نام‌گذاری سنگ‌های مورد مطالعه، شامل سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی استفاده شده است.

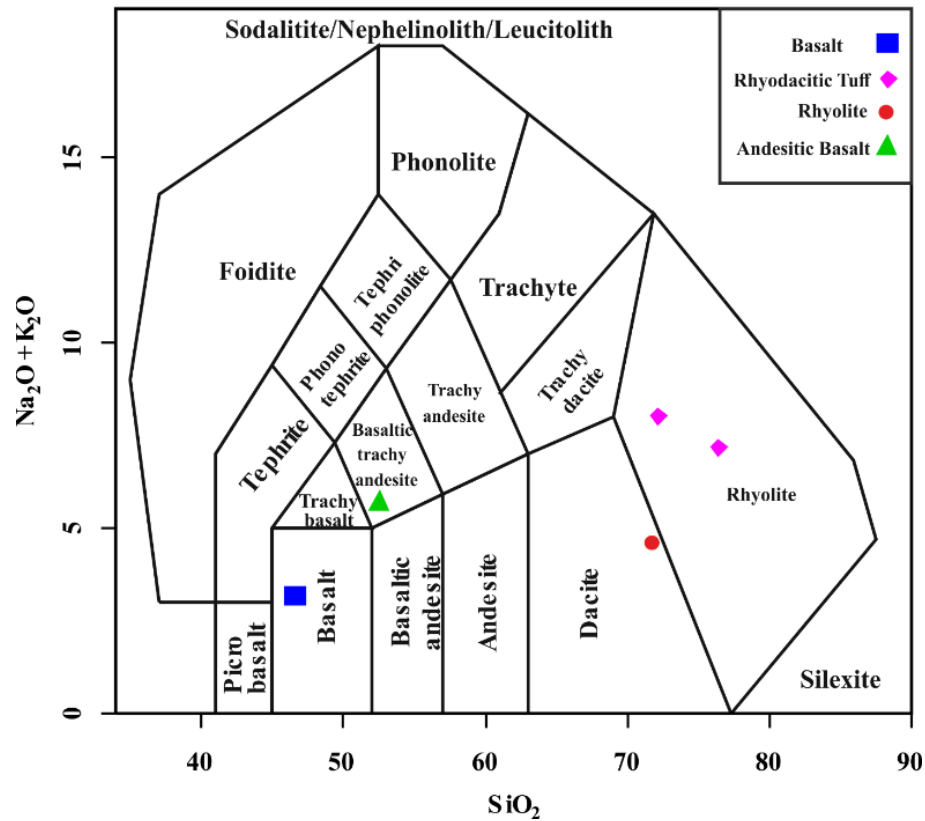
#### الف) طبقه‌بندی سنگ‌های آتشفشانی

بر اساس مطالعات سنگ‌نگاری، سنگ‌های آتشفشانی منطقه معدنی بافق شامل بازالت، بازالت آندزیتی، ریولیت و توف‌های ریولیتی تا ریوداسیتی بوده است. به منظور بررسی ویژگی‌های ژئوشیمیایی سنگ‌های مذکور از طبقه‌بندی‌های زیر استفاده شده است:

#### طبقه بندی میدل‌موست (Middlemost, 1994):

این طبقه‌بندی بر اساس نسبت  $(Na_2O + K_2O)$  در مقابل  $SiO_2$  طراحی شده است. بر اساس این رده-بندی، سنگ‌های آتشفشانی منطقه معدنی بافق در محدوده بازالت، تراکی آندزیت بازالتی، داسیت و ریولیت قرار می‌گیرند و انطباق خوبی با نام‌گذاری این سنگ‌ها براساس مطالعه مقاطع نازک دارند (شکل ۵-۱). این رده‌بندی برای سنگ‌های غنی از پتاسیم و سنگ‌های پرمیزیم که دگرسان شده یا

متحمل دگرگونی شده‌اند، مناسب نیست. زیرا این فرایندها باعث تحرک عناصر قلیایی می‌شوند  
(Rollinson, 1993).



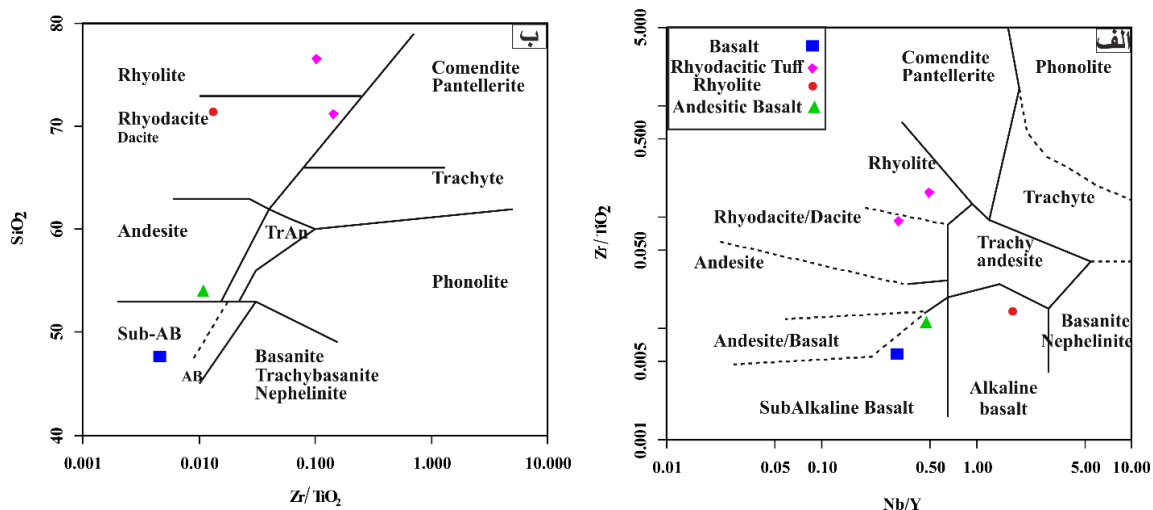
شکل ۵-۱: طبقه‌بندی سنگ‌های آتشفشانی منطقه با استفاده از نمودار (Middlemost, 1994)، که نمونه‌های سنگ‌های آتشفشانی در محدوده‌های بازالت، تراکی آندزیت بازالتی، داسیت و ریولیت قرار گرفته‌اند.

### طبقه‌بندی وینچستر و فلویید (Winchester and Floyd, 1977):

این طبقه‌بندی بر اساس نسبت  $Zr/TiO_2$  در برابر  $Nb/Y$  و با مقیاس لگاریتمی طراحی شده است. از ویژگی‌های این نمودار می‌توان به استفاده از عناصر کمیاب در جدا کردن مرز بین ترکیبات سنگی اشاره کرد. سنگ‌های آتشفشانی منطقه دارای محتوای سیلیس بین ۴۸ تا ۷۱/۷ درصد وزنی (wt.)، محتوای  $Al_2O_3$  بین ۲ تا ۱۵/۸ درصد وزنی (wt.%) و نسبت  $K_2O/Na_2O$  بین ۰/۲ تا ۵۴/۷ هستند. برای تعیین دقیق نوع سنگ و جلوگیری از تاثیر دگرسانی در نام‌گذاری آن‌ها، از نسبت عناصر غیر متحرک (نظیر Nb، Y، Ti و Zr) استفاده شد. که اغلب سنگ‌های منطقه با نسبت  $Nb/Y$  تقریبی ۰/۷ تا ۲/۳ و  $Zr/TiO_2$  بین ۰/۰۰۵ تا ۰/۵ در محدوده سنگ‌های ریولیت، ریوداسیت تا



داسیت، آلکالی بازالت و ساب‌آلکالی بازالت قرار گرفتند (شکل ۲-۵ الف). همچنین بر اساس نسبت  $\text{SiO}_2$  در مقابل  $\text{Zr/TiO}_2$  سنگ‌های آتشفشانی منطقه تنوع ترکیبی از ریولیت، ریوداست-داسیت، آندزیت و ساب‌آلکالی بازالت را نشان می‌دهند (شکل ۲-۵ ب). نکته حائز اهمیت در این طبقه‌بندی دو قطبی بودن ترکیبات سنگی منطقه است

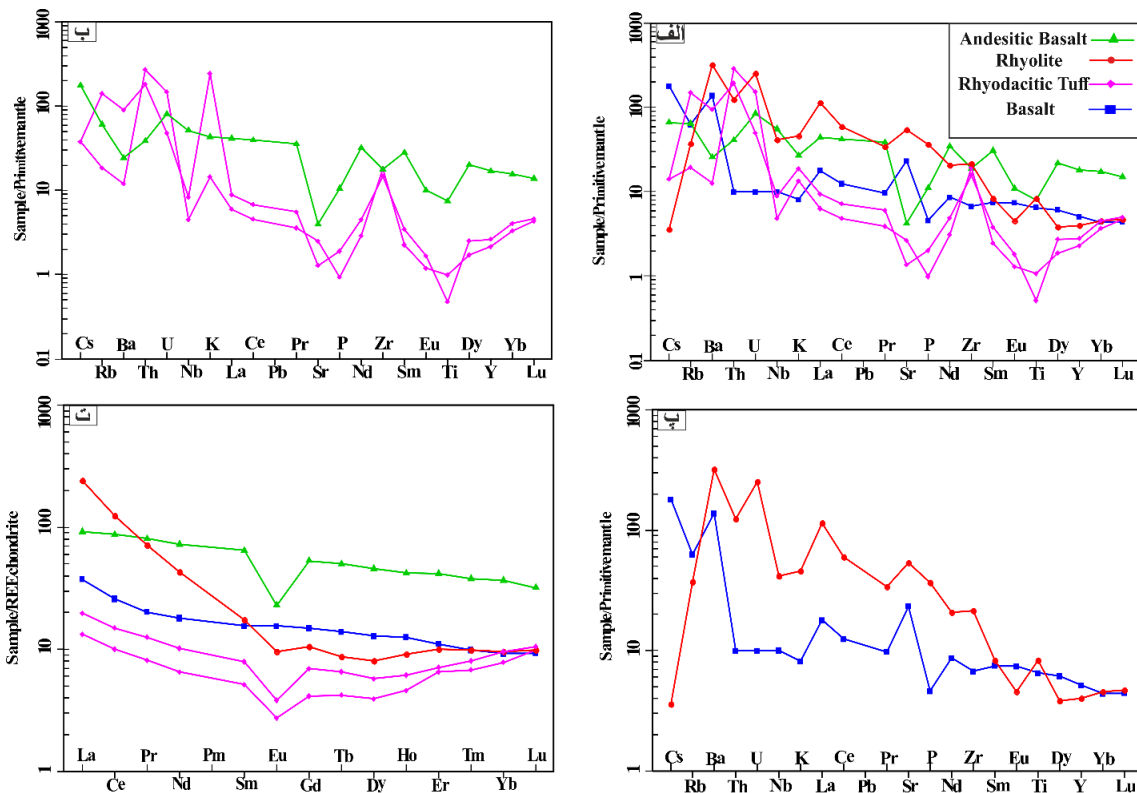


شکل ۲-۵: طبقه‌بندی سنگ‌های آتشفشانی منطقه با استفاده از نمودارهای (الف) Winchester and Floyd, 1977 و (ب) نمودار  $\text{Zr/TiO}_2$  در برابر  $\text{Nb/Y}$ ، نمودار  $\text{SiO}_2$  در برابر  $\text{Zr/TiO}_2$ . نمودارهای به‌هنجار شده سنگ‌های آتشفشانی:

نمودارهای به‌هنجار شده را می‌توان جهت تعیین نوع منشأ، کیفیت ذوب بخشی سنگ منشأ، تبلور بخشی ماگما و همچنین تفکیک سری‌های ماگمایی به‌کار برد. این نمودارها، نمودارهای چند عنصری به‌هنجار شده نسبت به استانداردهای معین می‌باشند. جهت تعیین اختلاف غلظت عناصر نسبت به یک استاندارد معین، از به‌هنجار سازی نمونه‌ها نسبت به آن واحد استاندارد استفاده می‌شود که با تقسیم کردن غلظت هر یک از عناصر به غلظت همان عنصر در نمونه استاندارد محقق می‌گردد. در نمودار عنکبوتی به‌هنجار شده به ترکیب گوشته اولیه (McDonough and Sun, 1995)، سنگ‌های آتشفشانی منطقه که دارای ترکیب بازالت، ریولیت، توف ریولیتی و بازالت آندزیتی هستند، از الگوی مشابهی پیروی نمی‌کنند (شکل ۴-۵ الف). به همین منظور نمونه‌های با الگوی به‌هنجار شده یکسان و مشابه با یکدیگر آورده شده اند (شکل ۴-۵ ب). سنگ‌های توف ریوداستیتی و بازالت آندزیتی از الگوی

مشابهی برخوردار هستند. این الگوی مشابه می‌تواند بیانگر ارتباط ژنتیکی این دو گروه سنگی مورد مطالعه باشد. عناصر Ti، Sr، P، Nb، Ba در سنگ‌های آتشفشانی منطقه آنومالی منفی و عناصر K، U، Zr، Th آنومالی مثبت نشان می‌دهند (شکل ۴-۵ ب). به باور (Rollinson, 1993)، آنومالی منفی Nb و Ti: الف) شاخص محیط‌های قوسی می‌باشد. ب) مشخصه ماگماتیسم مرتبط با فرایند فرورانش و کمان آتشفشانی کالک آلکالن است. پ) از مشخصه سنگ‌های پوسته قاره‌ای و شرکت پوسته در فرایندهای ماگمایی است. ت) نشانه فقر این عناصر، در منشا پایداری فازهای حاوی این عناصر در طی فرایند تفریق است. به عبارت دیگر می‌توان گفت آنومالی منفی عناصر Nb و Ti به دلیل مقدار پایین این عناصر در پوسته قاره‌ای، حضور این عناصر در فازهای دیرگداز ورقه اقیانوسی فرورونده نظیر روتیل، ایلمنیت، زیرکن و تیتانومگنتیت که در زمان نئوپروتوزئیک بالایی - کامبرین زیرین ریفت بوده و لی قبل از آن پشته‌های میان اقیانوسی بوده است. به طور کلی تهی‌شدگی عناصر با میدان پایداری بالا (HFSE) مانند Ti، P، Nb، K، Rb، Ba و Th (LILE) نظیر (LILE) بزرگ غنی‌شدگی عناصر با شعاع یونی بزرگ (Foley and Wheller, 1990). در نمودار به‌هنجار شده نسبت به گوشته اولیه برای دو نمونه بازالیت و ریولیت تهی‌شدگی عنصر فسفر احتمالاً ناشی از شرکت این عنصر در مراحل نخستین تبلور ماگما بوده که به تدریج طی افزایش تبلور ماگما از میزان  $P_2O_5$  کاسته می‌شود عناصر LILE نظیر Ba، K، Rb نسبت به عناصر HFSE و LREE نظیر Nb، Ti، Sm، Eu، La غنی‌شدگی از خود نشان می‌دهند. بی-هنجاری منفی Rb و Cs ناشی از هوازدگیمی‌باشد (شکل ۴-۵ ب). در نمودار الگوی به‌هنجار شده نمونه‌های سنگ‌های آتشفشانی منطقه نسبت به کندریت (Boynton, 1984)، عناصر کمیاب خاکی سبک نسبت به عناصر کمیاب خاکی سنگین غنی‌شدگی نشان می‌دهند. علاوه بر این در الگوهای رسم شده، بی‌هنجاری منفی در Eu دیده می‌شود که طبق پژوهش هو و همکاران (Hu et al., 2015)، در صورتی که به‌هنجاری منفی Eu همراه با بی‌هنجاری منفی عناصر Ba و Sr باشد، ماگمای سازنده سنگ بر اثر تفریق پلاژیوکلاز و آلکالی‌فلدسپار ایجاد می‌شود. همچنین، طبق بررسی‌های (Halliday

(et al., 1991)، تهی‌شدگی عنصر Sr ناشی از جدایش فازهای کانیاپی پلاژیوکلاز از مذاب اولیه بوده که در اثر رخداد مداوم فرایندهای تفریق بلورین، تهی‌شدگی این عنصر تشدید می‌شود (شکل ۴-۵ ت).



شکل ۳-۵: الف، ب، پ) الگوهای به‌هنجار شده مقادیر عناصر کمیاب سنگ‌های آتشفشانی به ترکیب گوشته اولیه، ت) الگوی به‌هنجار شده مقادیر عناصر کمیاب خاکی سنگ‌های آتشفشانی به کندریت.

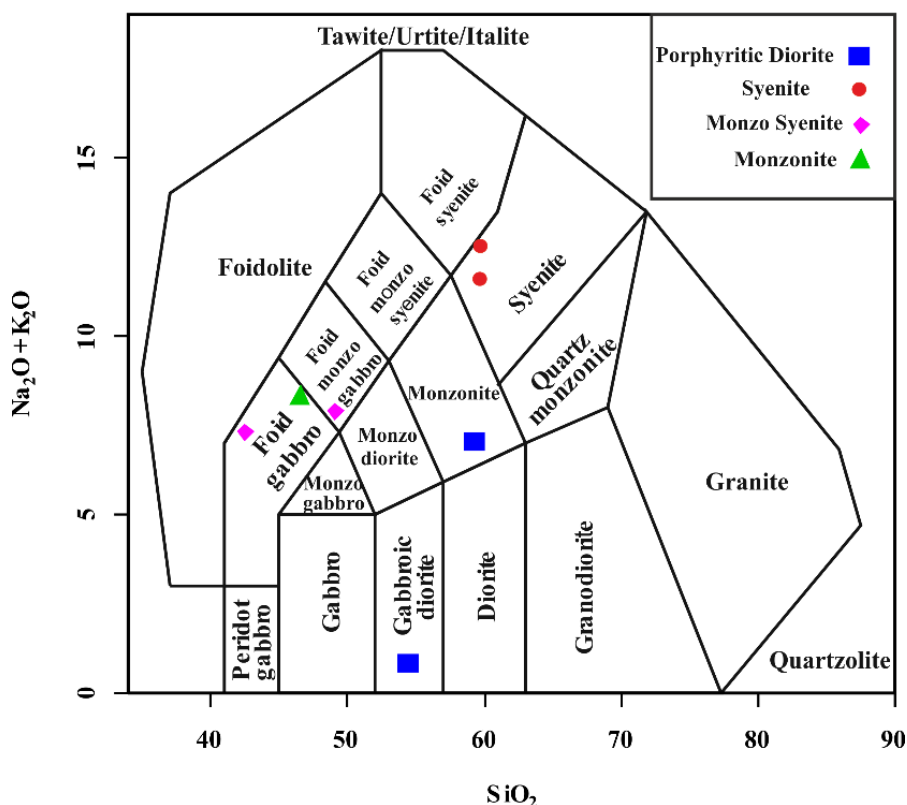
### ب) طبقه‌بندی سنگ‌های آذرین درونی

سنگ‌های نفوذی منطقه مورد مطالعه طیفی از سینیت، مونزوسینیت، مونزونیت و دیوریت می‌باشد. به منظور بررسی ویژگی‌های ژئوشیمیایی این سنگ‌ها از طبقه‌بندی‌های زیر استفاده شده است.

– طبقه‌بندی میدل‌موست (Middlemost, 1994):

این نمودار رده‌بندی بر اساس درصد وزنی  $\text{SiO}_2$  در مقابل مجموع درصد وزنی  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  استوار است. با توجه به این نمودار، سنگ‌های آذرین درونی منطقه بافق در محدوده گابرودیوریت، مونزونیت، فوئیدگابرو، فوئیدمونزوگابرو و سینیت واقع شده‌اند که شواهد صحرایی و پتروگرافی این سنگ‌ها نیز موید این مطلب می‌باشد (شکل ۴-۵).

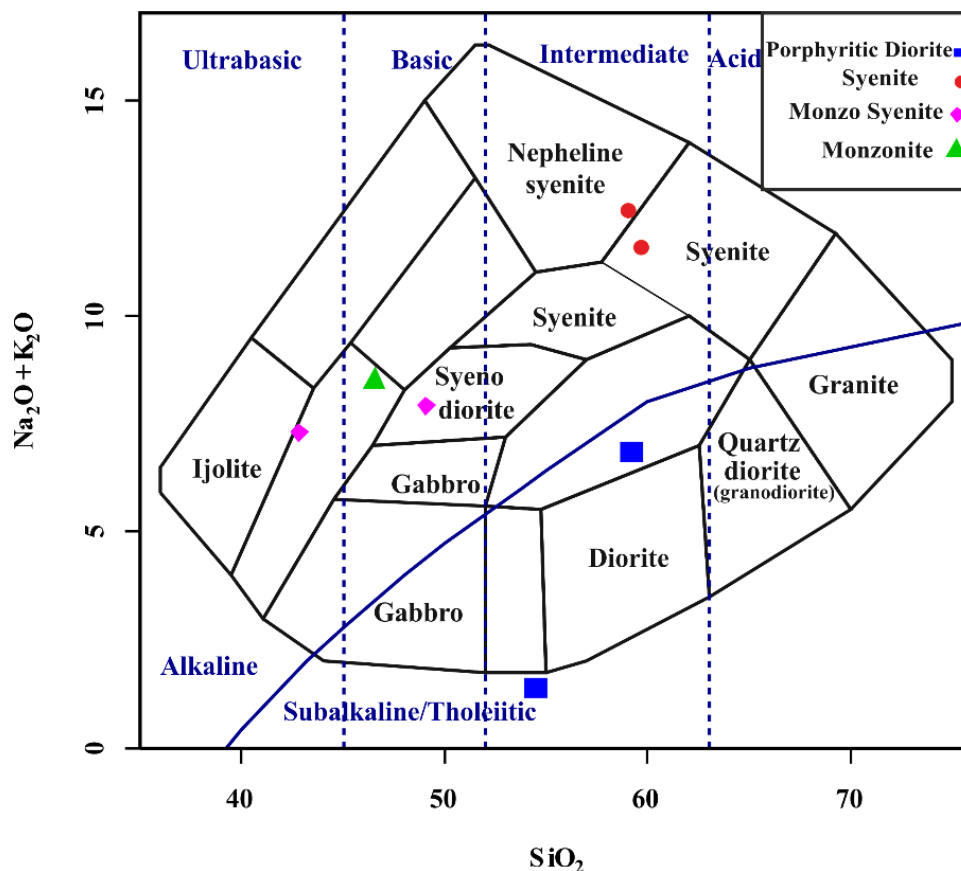
### Middlemost (1994)



شکل ۴-۵: طبقه‌بندی سنگ‌های نفوذی منطقه با استفاده از نمودار (Middlemost, 1994).

طبقه‌بندی (Cox, 1979):

این نمودار روش TAS نیز نامیده می‌شود (TA= Total Alkali, S= SiO<sub>2</sub>) که اولین بار توسط کاکس و همکاران (Cox et al., 1979) برای سنگ‌های آذرین درونی ارائه شده است. در این نمودار بر اساس میزان SiO<sub>2</sub> سنگ‌های آذرین درونی به گروه‌های مختلف مانند اولترامافیک، مافیک، حدواسط و فلسیک طبقه‌بندی شده‌اند و همچنین توسط یک خط ممتد محدوده‌های آلكالی و ساب‌آلكالی از یکدیگر تفکیک شده است. سنگ‌های آذرین درونی مورد مطالعه بر روی این نمودار، در محدوده‌های ترکیبی سینودیوریت، سینیت، نفلین سینیت، دیوریت و ایژولیت قرار گرفته‌اند که به استثنای یک نمونه، نتایج با آنچه از نمودار سیلیس در مقابل مجموع آلكالی (Middlemost, 1994) بدست آمده است، همخوانی دارند. نمونه‌ای که در محدوده ایژولیت قرار می‌گیرد در حقیقت یک مونزوسینیت غنی از آمفیبول است (به دلیل متاسوماتیسم و رشد آمفیبول اضافی) که به دلیل پایین بودن میزان SiO<sub>2</sub> آمفیبول (کمتر از ۴۰٪) در نمودار رده‌بندی شیمیایی در محدوده ایژولیت قرار می‌گیرد (شکل ۵-۵).

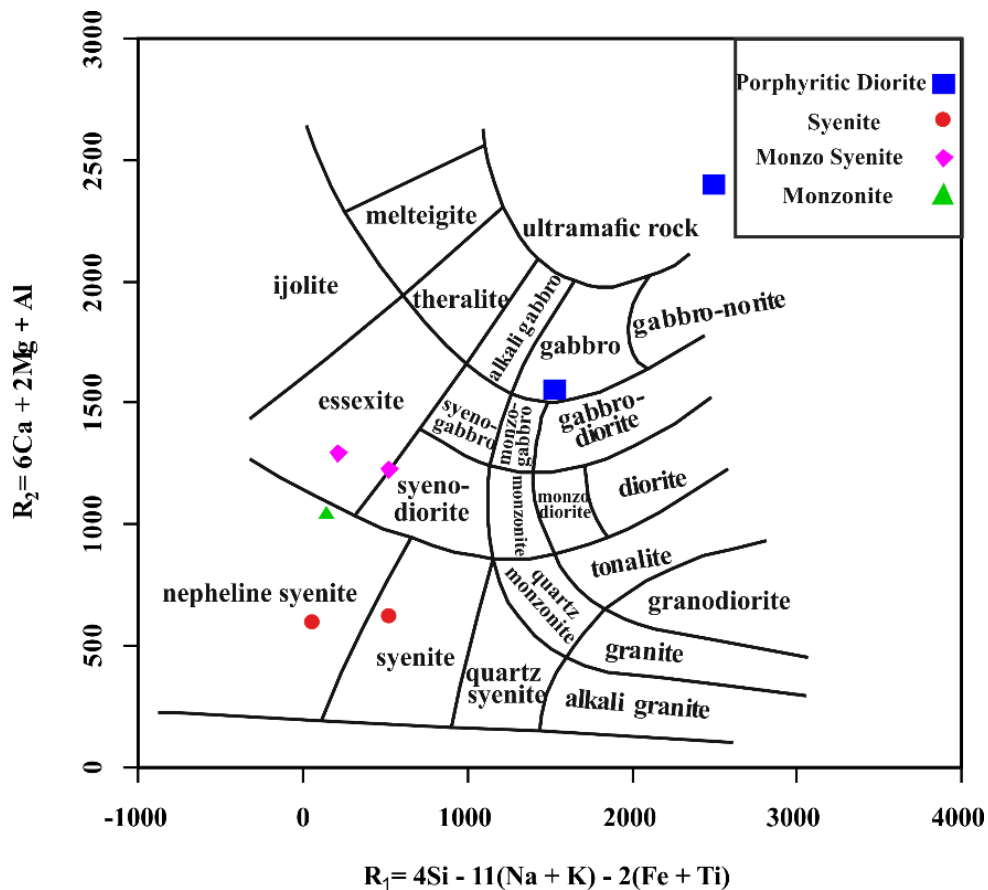


شکل ۵-۵: طبقه‌بندی سنگ‌های نفوذی منطقه مورد مطالعه با استفاده از نمودار (Cox, 1979).

### طبقه‌بندی (De la Roche et al., 1980):

نمودار دو متغیره (De la Roche et al., 1980) بر اساس نسبت‌های کاتیونی عناصر طراحی گردیده است، و برای طبقه‌بندی سنگ‌های نفوذی خیلی مناسب است. در این طبقه‌بندی از پارامترهای  $R_1$  و  $R_2$  استفاده می‌شود، که توسط معادله‌های ریاضی  $R_1=4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti)$  و  $R_2=6Ca+2Mg+Al$  محاسبه می‌شوند. مزایای این رده‌بندی برای سنگ‌های پلوتونیک این است که: الف) از شیمی تمام عناصر اصلی سنگ برای در رده‌بندی استفاده می‌شود، ب) این روش به اندازه‌ای کلی هست که برای همه سنگ‌های آذرین کاربرد داشته باشد، پ) ترکیب کانی‌ها را می‌توان از روی نمودار پیدا کرد و مقایسه‌ای وسیع میان داده‌ها مودال و شیمیایی انجام داد، ت) میزان اشباع‌شدگی از سیلیس و تغییر ترکیب فلدسپارها را می‌توان نشان داد (Rollinson, 1993). بر اساس این طبقه‌بندی

توده‌های نفوذی منطقه بافق در محدوده گابرو، سینیت، نفلین سینیت، سینودیوریت واقع شدند (شکل ۵-۶).

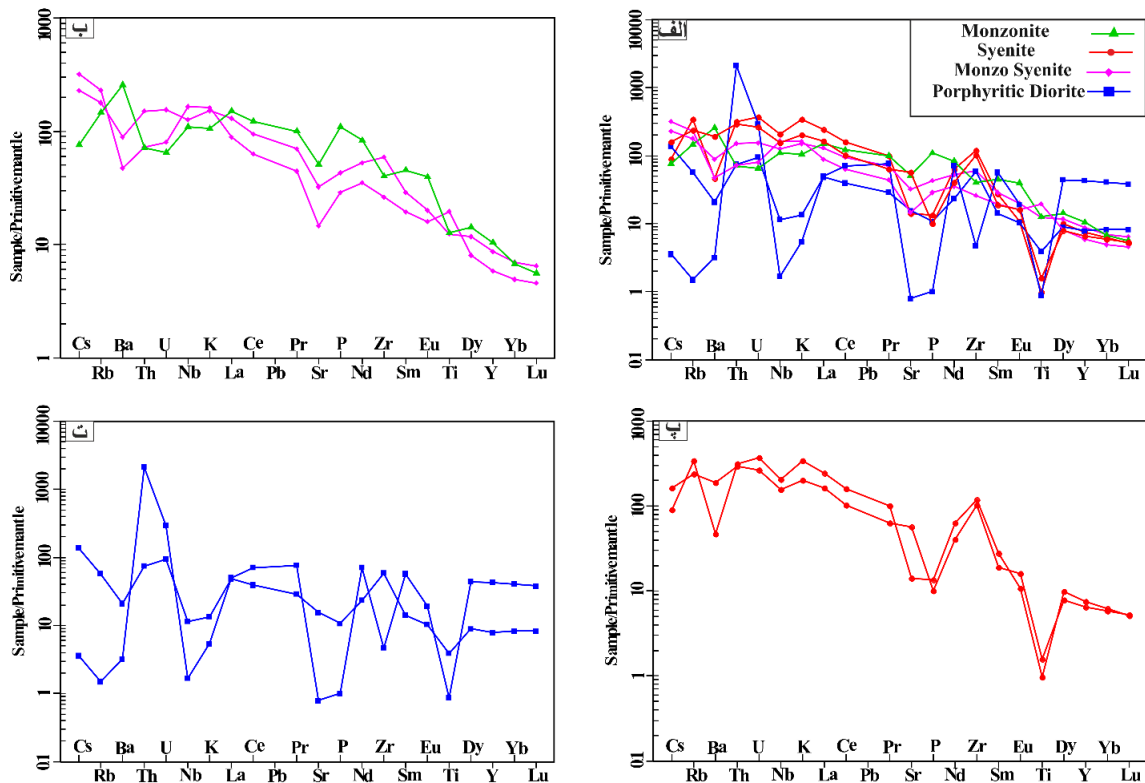


شکل ۵-۶: طبقه‌بندی سنگ‌های نفوذی منطقه با استفاده از نمودار (De la Roche et al., 1980).

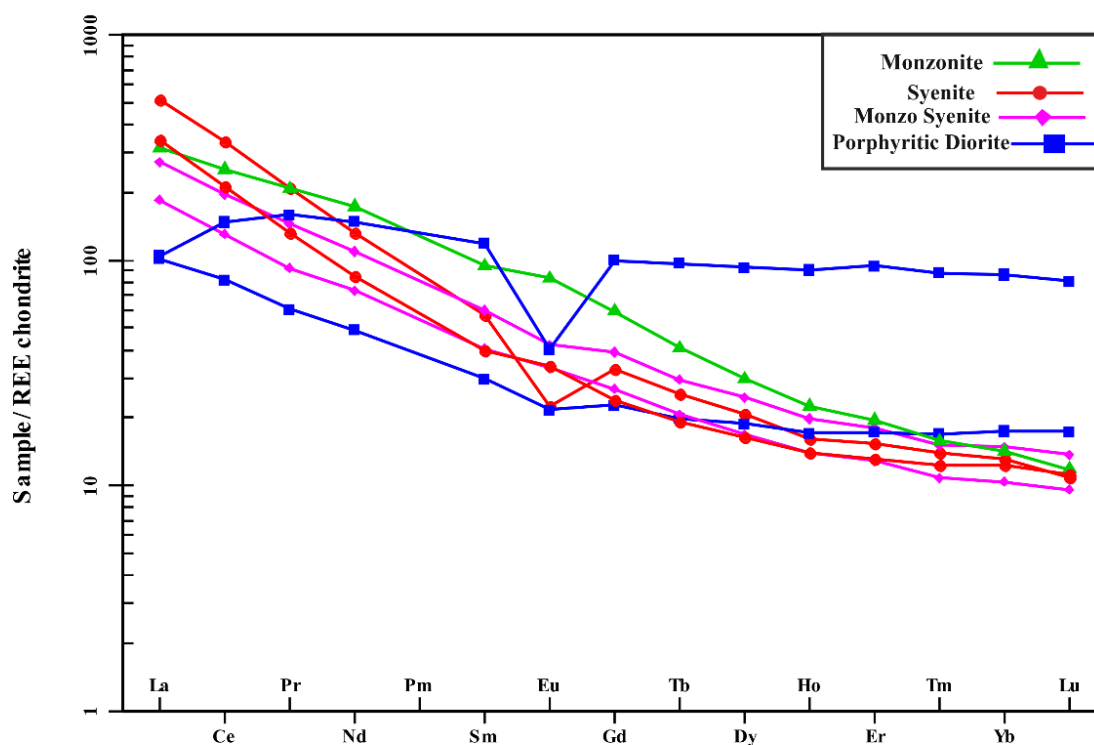
### نمودارهای به‌هنجارشده سنگ‌های آذرین درونی:

برای دستیابی به محیط تکتونوماگمایی سنگ‌های نفوذی منطقه مورد مطالعه از الگوی به‌هنجار شده توزیع عناصر کمیاب و کمیاب خاکی استفاده شد. در نمودار الگوی به‌هنجار شده عناصر کمیاب به ترکیب گوشته اولیه (McDonough and Sun, 1995)، نمونه‌های نفوذی منطقه همانند سنگ‌های آتشفشانی از الگوی مشخصی پیروی نمی‌کنند (شکل ۵-۷ الف). بنابراین برای تفسیر بهتر رفتار آنها، این نمونه‌ها از یکدیگر تفکیک شده‌اند. نمونه‌های مونزوسینیت و مونزونیت بی‌هنجاری منفی در عناصر LILE نظیر Eu، Sr و Pb از خود نشان می‌دهند. همچنین عناصر LREE نسبت به HREE دارای غنی‌شدگی هستند (شکل ۵-۷ ب). تفسیر نمونه‌های سینیت که به گوشته اولیه به‌هنجار شده‌اند،

نشان می‌دهد که عناصر گروه HFSE نظیر Y، Zr و Th نسبت به عناصر گروه LILE مانند Sr، Eu و Pb از خود غنی‌شدگی نشان می‌دهند (شکل ۷-۵ پ). در نمونه دیوریت پورفیری که به گوشته اولیه به‌هنجار شده است، عناصر LREE از خود بی‌هنجاری منفی نشان می‌دهند. همچنین عناصر گروه LILE نظیر Sr، Eu و Rb از خود آنومالی منفی بروز می‌دهند (شکل ۷-۵ ت).



شکل ۷-۵: الگوهای به‌هنجار شده مقادیر عناصر کمیاب سنگ‌های نفوذی منطقه بافق به ترکیب گوشته اولیه. الف) تمامی سنگ‌های نفوذی، ب) مونزونیت و مونزوسینیت، پ) سینیت، ت) دیوریت پورفیری  
 الگوی عناصر کمیاب خاکی سنگ‌های نفوذی منطقه به ترکیب کندریت (Boynton, 1984) به‌هنجار شده است. این الگوها برای همه نمونه‌ها دارای شیب منفی بوده ( $LREE/HREE > 1$ ), و نشانگر غنی‌شدگی آنها در LREE هستند (شکل ۷-۵)، که از ویژگی‌های ژئوشیمیایی برجسته سنگ‌های آذرین مرتبط با کانسارهای آهن-آپاتیت تیپ کایرونا است (Edfelt, 2007).



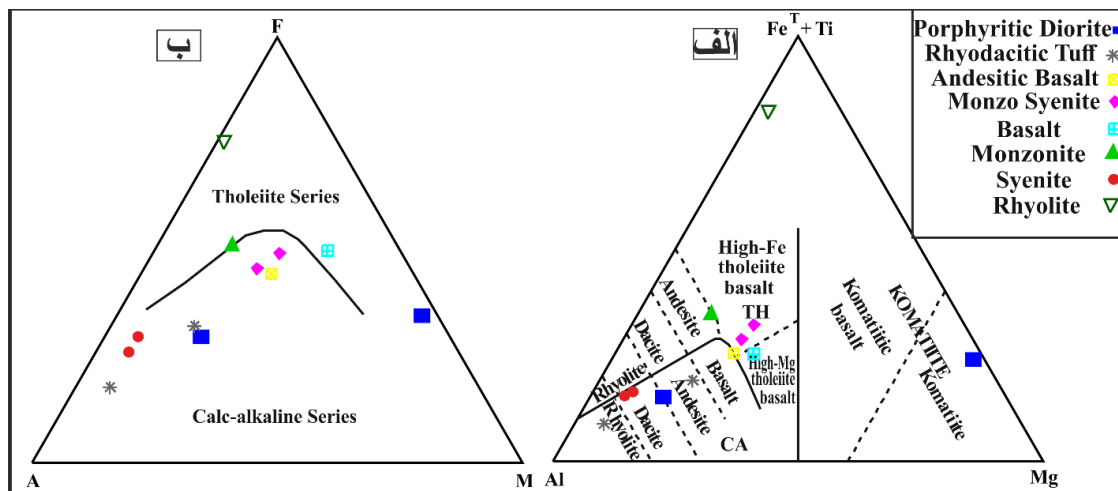
شکل ۵-۸: الگوی به‌هنجار شده توزیع عناصر کمیاب خاکی در انواع سنگ‌های نفوذی منطقه به کندریت.

### پ) بررسی سرشت ماگمایی

روند تدریجی و پیوسته تغییرات در ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی از یک ماگما به ماگمای دیگر می‌تواند حاکی از رابطه خویشاوندی دو ماگما باهم و منشا گرفتن آن‌ها از یک منبع مشترک باشد. این منبع می‌تواند یک سنگ مادر مشترک یا یک مخزن ماگمایی مشترک تفریق یافته باشد. به باور (Kunu, 1968)، هر سری ماگمایی مجموعه‌ای از سنگ‌های آذرین دارای ترکیب شیمیایی متفاوت اما وابسته به هم را در بر می‌گیرد که از تفریق یک ماگمای بازیک مادر و یا از ذوب بخشی سنگ منشا حاصل شده‌اند. جدا از پدیده تفریق ماگمایی و ذوب بخشی که به عنوان مهم‌ترین عوامل در تعیین سری ماگمایی محسوب می‌شوند، عوامل دیگری همچون اختلاط و آلیش ماگمایی نیز می‌توانند در ژنز سنگ‌ها موثر واقع شوند. در این بخش، به منظور تعیین سری ماگمایی و تفسیر بهتر و دقیق‌تر سنگ‌های آذرین منطقه مورد مطالعه از نمودارهایی که توسط محققین مختلف پیشنهاد گردیده است، جهت تعیین سری ماگمایی سنگ‌های منطقه استفاده شده است.



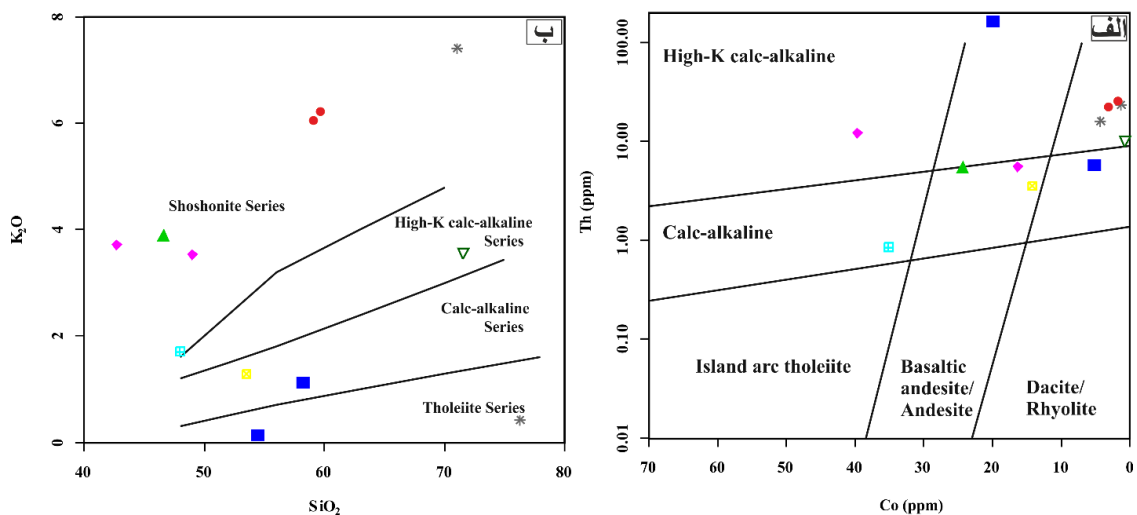
نمودار کاتیونی (Jensen, 1982) یک روش طبقه‌بندی برای سنگ‌های آتشفشانی کالک‌آلکان و تولییتی می‌باشد که بر مبنای درصد کاتیون‌های عناصر Fe, Ti, Al و Mg می‌باشد. انتخاب این عناصر به علت قابلیت تغییرشان در سنگ‌های مختصرآلکان، تغییرات آن‌ها به نسبت عکس هم و نیز پایداریشان تحت درجات پایین دگرگونی است. از ویژگی‌های این نمودار عدم استفاده از عناصر آلکان است لذا برای سنگ‌های شدیداً دگرسان شده و کمی دگرگون شده قابل استفاده می‌باشد. بر اساس این نمودار سنگ‌های آتشفشانی منطقه بیشتر از نوع ریولیت، آندزیت، بازالت، بازالت تولییتی پرمینیم کالک‌آلکان و بازالت تولییتی پراهن هستند (شکل ۵-۹ الف). نمودار (Irvine and Baragar, 1971) یا نمودار AFM یکی از مشهورترین نمودارهای مثلی است که در آن تغییرات شیمیایی موجود در سری ماگمایی مورد بررسی قرار می‌گیرد. این نمودار دارای سه راس  $A=(Na_2O+K_2O)$ ،  $M=MgO$ ،  $F=(FeO+Fe_2O_3)$  می‌باشد. که محدوده‌های تولییتی را و کالک‌آلکان را از هم جدا می‌کند. در نمودار AFM، بخش عمده نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده کالک‌آلکان قرار می‌گیرند. تنها نمونه ریولیت در محدوده تولییتی قرار گرفته است (شکل ۵-۹ ب).



شکل ۵-۹: تعیین ماهیت زمین‌شیمیایی سنگ‌های آذرین منطقه. الف) نمودار (Jensen, 1982)، ب) نمودار (Irvine and Baragar, 1971)

همچنین بر اساس نمودار دو متغیره (Hastie et al., 2007) که بر اساس عناصر غیرمتحرک Co در مقابل Th ارائه شده است. همان‌طور که نمودار نشان می‌دهد سنگ‌های منطقه عمدتاً با ماهیت کالک‌آلکان غنی از پتاسیم در موقعیت بازالت آندزیتی، آندزیت تا ریولیت و داسیت قرار گرفتند. نمونه

مونزونیت در مرز محدده بین کالک‌آلکالن و کالک‌آلکالن غنی از پتاسیم واقع شده است. همچنین چهار نمونه مونزوسینیت، دیوریت پورفیری، بازالت و بازالت‌آندزیتی در محدوده کالک‌آلکالن قرار گرفته‌اند (شکل ۵-۱۰ الف). در نمودار  $K_2O$  در مقابل  $SiO_2$  (Peccerillo and Taylor, 1976)، که سنگ‌های منطقه را بر اساس مقادیر  $SiO_2$  و  $K_2O$  به تقسیمات جزئی تری تقسیم می‌کند، بیشتر نمونه‌ها در محدوده شوشونیتی قرار گرفته‌اند. که باید گفت نسبت  $K_2O/Na_2O$  این سنگ‌ها بیشتر از یک می‌باشد که شوشونیت بودن آن را تایید می‌کند. از آنجایی که سری شوشونیتی در اکثر نقاط همراه با سری کالک‌آلکالن دیده می‌شود، بنابراین ممکن است ماگمای شوشونیتی نتیجه تحول ماگمای کالک‌آلکالن باشد (Rollinson, 1993). نمونه بازالتی حدفاصل سری شوشونیتی و کالک‌آلکالن با پتاسیم بالا و نمونه ریولیتی در محدوده کالک‌آلکالن با پتاسیم بالا قرار گرفته‌اند. دو نمونه بازالت‌آندزیتی و دیوریت پورفیری در سری کالک‌آلکالن قرار گرفته‌اند. همچنین یک نمونه توف ریوداسیتی و دیوریت پورفیری در سری تولئیتی واقع شده‌اند (شکل ۵-۱۰ ب).

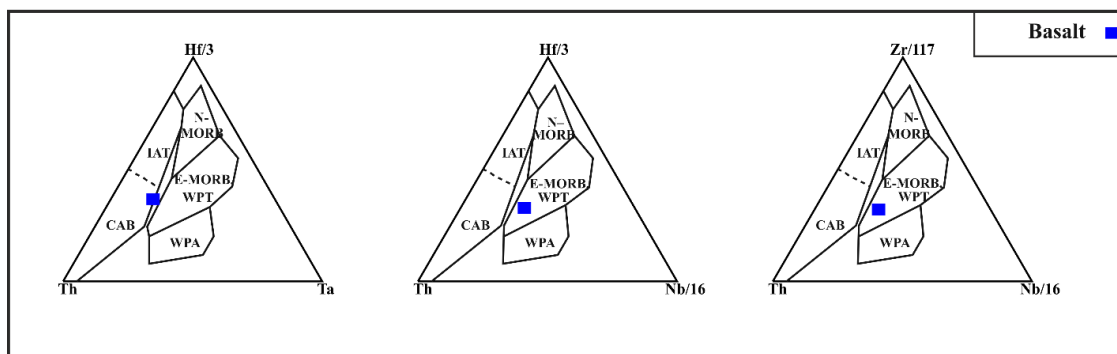


شکل ۵-۱۰ الف) تعیین میزان آلکالینیت و جنس سنگ‌های منطقه با استفاده از نمودار دوتایی Th در مقابل Co (Peccerillo and Taylor, 1976)؛ ب) محل قرارگیری نمونه‌های مورد مطالعه در نمودار  $K_2O$  در مقابل  $SiO_2$  (Hastie et al., 2007).

## ت) تعیین جایگاه تکتونیکی

در این بخش سعی شده است با کمک نمودارهای تمایز محیط تکتونیکی، محل تشکیل سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی منطقه معدنی بافق مورد بررسی قرار می‌گیرند. این نمودارها عمدتاً بر پایه عناصر کمیاب غیرمتحرک با قدرت میدان بالا (HFSE) ترسیم شده‌اند زیرا عناصر مذکور در فازهای سیال در طول هوازدگی و دگرگونی انتقال نمی‌یابند (Wilson, 1943). به منظور تعیین خاستگاه زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی منطقه مورد مطالعه سعی شد از نمودارهای تمایز انواع بازالت‌ها و سنگ‌های گرانیتی استفاده شود اما به دلیل رخداد دگرسانی گسترده در منطقه و محدود بودن تعداد نمونه‌ها، نمودارهای مختلف نتایج بسیار متفاوت و گاه متناقضی ارائه می‌دهند. این مشکل در مطالعات پیشین نیز در ناحیه معدنی بافق گزارش شده است (Torab, 2008).

وود (Wood, 1980)، با استفاده از عناصر کمیاب  $Hf$ ،  $Th$ ،  $Zr$ ،  $Nb$  نمودارهایی ارائه داد که بر اساس آن نمونه بازالتی در محیط‌های E-MORB WPT و CAB قرار می‌گیرند ولی براساس شواهد زمین‌شناسی و تکتونیکی منطقه، سنگ‌های آتشفشانی در یک محیط ریفت درون قاره‌ای شکل گرفته‌اند (شکل ۵-۱۱).

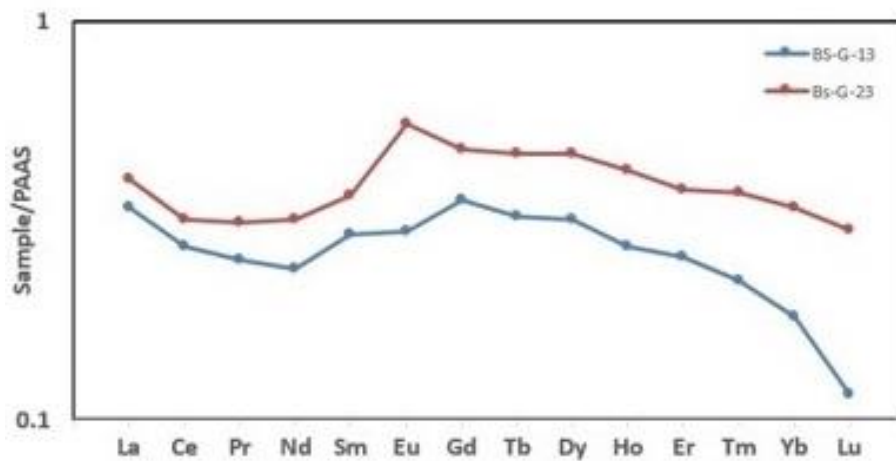


شکل ۵-۱۱: تعیین محیط تکتونیکی سنگ‌های آتشفشانی منطقه با استفاده از نمودارهای (Wood, 1980)

## ش) ژئوشیمی دولومیت

مجموع مقادیر عناصر کمیاب خاکی در دولومیت‌های منطقه بافق، بین ۰/۰۵ تا ۱۵/۴ گرم در تن متغیر است. در الگوی به‌هنجار شده توزیع عناصر کمیاب خاکی در دولومیت‌های منطقه به ترکیب

شیل‌های پس از آرکئن استرالیا (McLennan, 1989)، عناصر کمیاب خاکی میانی (Sm تا Ho) در مقایسه با انواع سبک و سنگین غنی شدگی نشان می‌دهند (شکل ۵-۱۲).



شکل ۵-۱۲: الگوی به‌هنگار شده توزیع عناصر کمیاب خاکی در دولومیت‌های منطقه: به ترکیب شیل‌های پس از آرکئن استرالیا (McLennan, 1989).

فصل هشتم

زمین شیمی کانسنگ

## ۱-۶- ژئوشیمی کانسنگ‌های منطقه بافق

برای مطالعه ژئوشیمی کانسنگ‌های منطقه فلززائی بافق تعداد ۱۱ نمونه کانسنگ برداشت شده است. از این میان تعداد ۴ نمونه از کانسنگ‌های غنی از مگنتیت محدوده‌های چغارت (BC-G-20)، اسفوردی (BE-G-04)، لکه‌سیاه (BL-G-17) و گزستان (BG-G-09)، تعداد ۳ نمونه از کانسنگ‌های غنی از آپاتیت محدوده اسفوردی (BE-G-05، BE-G-06، BE-G-07)، و تعداد ۴ نمونه از کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت محدوده‌های چغارت (BC-G-19)، اسفوردی (BE-G-03) و گزستان (BG-G-11، BG-G-12) انتخاب شده است. تمامی نمونه‌های کانسنگ پس از خردایش و نرمایش به روش ذوب قلیایی و با استفاده از دستگاه‌های ICP-AES/MS برای عناصر اصلی، کمیاب و کمیاب خاکی در آزمایشگاه اکی (Acme lab) کشور کانادا تجزیه شده‌اند (جدول ۱-۶).

جدول ۶-۱: مقادیر غلظت اکسید عناصر اصلی (درصد وزنی)، عناصر فرعی، کمیاب و کمیاب خاکی (گرم در تن) در نمونه‌های کانسنگ مناطق مورد مطالعه به روش‌های ICP-AES/MS.

مکان	لکه- سیاه										
	اسفوردی			گزستان						چغارت	
آزمایشگاه	Acme labs کانادا										
نمونه‌ها	BE-G-3	BE-G-4	BE-G-5	BE-G-6	BE-G-7	BG-G-9	BG-G-11	BG-G-12	BL-G-17	BC-G-19	BC-G-20
SiO <sub>2</sub>	5.21	6.49	4.28	9.14	27.31	6.69	10.11	1.99	0.91	35.03	1.59
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.15	0.25	0.03	0.09	0.16	0.25	0.47	0.23	0.19	0.64	0.29
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.68	84.96	5.03	4.69	4.89	75.29	54.05	23.88	92.97	14.25	90.65
MgO	0.19	0.28	0.09	0.62	4.82	0.10	0.34	0.15	0.49	10.63	1.16
CaO	48.76	3.69	51.69	48.40	36.59	10.52	19.96	42.22	3.72	23.60	3.59
Na <sub>2</sub> O	0.14	0.04	0.15	0.25	0.28	0.02	0.09	0.07	0.06	0.49	0.06
K <sub>2</sub> O	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.01	0.03	<0.01	0.04	0.32	0.01
TiO <sub>2</sub>	0.16	0.91	0.08	0.45	0.29	0.24	0.29	0.34	0.34	3.20	0.92
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	17.82	1.56	35.51	30.99	23.23	5.84	11.91	19.36	0.47	8.53	1.51
MnO	0.10	0.02	0.02	0.06	0.04	0.05	0.06	0.13	0.03	0.28	0.06
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.006	0.003	0.010	0.011	0.010	0.004	0.009	0.007	0.003	0.013	0.186
LOI	17.5	1.3	1.2	3.3	0.9	0.4	1.5	10.3	0.5	2.3	-0.6
Sum	98.75	99.53	98.13	98.01	98.55	99.42	98.83	98.69	99.76	99.30	99.46
C	4.94	0.37	0.82	1.31	0.06	0.63	0.89	3.33	0.74	0.39	0.67
S	0.05	<0.02	0.07	0.08	0.05	<0.02	<0.02	0.02	<0.02	0.75	0.05
Ba	1	4	12	12	82	21	30	44	13	25	16
Be	1	3	<1	2	21	2	<1	6	2	2	2
Co	0.2	60.6	0.3	10.1	5.9	3.1	12.6	101.4	52.6	72.7	62.4
Cs	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.3	<0.1	<0.1
Ga	0.5	27.8	<0.5	<0.5	<0.5	17.3	15.4	7.0	12.9	3.2	28.0
Hf	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.3	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	1.2	<0.1
Nb	0.1	2.4	0.4	6.3	3.9	6.3	4.6	1.7	2.1	38.0	2.4
Ni	20	219	<20	24	<20	42	31	49	233	186	248
Rb	0.1	0.3	0.2	0.3	0.7	0.5	1.1	0.8	3.3	4.4	0.9
Sc	1	1	2	4	8	2	5	12	7	14	2
Sn	1	23	8	8	4	23	19	11	34	10	21
Sr	0.5	26.0	327.6	326.9	245.5	77.0	112.0	185.5	14.6	86.2	16.6
Ta	0.1	0.2	<0.1	1.1	0.4	0.6	0.4	0.2	0.2	4.0	0.3
Th	0.2	5.0	96.6	90.5	82.8	31.3	59.0	68.7	6.2	171.6	19.0
U	0.1	2.7	22.4	12.1	9.5	4.5	8.7	8.4	0.6	10.2	0.8
V	8	1820	321	153	123	818	708	504	769	365	2294
W	0.5	1.8	0.7	0.5	2.2	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	0.8	<0.5
Y	0.1	98.5	1336.3	1412.9	1044.0	699.9	1161.0	1082.8	38.6	485.4	59.4
Zr	0.1	4.3	3.3	23.8	16.5	6.4	7.6	8.9	4.9	32.1	3.4
La	0.1	155.2	2689.3	2973.4	2010.7	446.9	1287.0	1608.7	72.5	534.1	111.7

Ce	0.1	355.7	6408.1	6889.5	4645.0	1028.6	3121.0	3824.3	170.4	1217.0	245.1
Pr	0.02	42.02	711.67	754.48	510.92	132.46	378.89	461.08	19.12	153.69	27.60
Nd	0.3	155.0	2601.0	2729.5	1860.7	528.2	1471.1	1811.4	62.3	603.0	95.7
Sm	0.05	27.85	407.58	411.10	289.98	102.85	274.48	326.53	8.55	111.06	15.03
Eu	0.02	2.00	36.05	38.36	26.22	8.28	20.81	28.97	0.89	11.39	1.23
Gd	0.05	24.66	356.60	367.16	265.14	122.29	265.13	301.64	7.47	106.50	13.56
Tb	0.01	3.19	43.78	47.09	33.71	18.98	37.16	38.10	1.02	14.82	1.82
Dy	0.05	16.51	230.34	247.79	176.55	111.30	205.89	200.15	5.95	84.00	9.82
Ho	0.02	3.27	44.80	48.62	34.87	24.19	41.57	37.68	1.23	16.63	1.98
Er	0.03	9.10	122.60	132.96	95.06	69.32	114.30	103.02	3.66	47.31	5.33
Tm	0.01	1.17	14.95	16.88	11.73	8.79	14.10	12.73	0.49	6.17	0.68
Yb	0.05	6.79	82.25	93.74	65.19	49.98	79.36	70.84	3.23	35.14	3.89
Lu	0.01	0.92	10.59	12.05	8.25	6.56	10.03	9.25	0.47	4.73	0.49

### ۶-۱-۱- بررسی تغییرات مقادیر غلظت عناصر در نمونه‌های کانسنگ

در این بخش، بر اساس نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های کانسنگ تغییرات غلظت عناصر اصلی و کمیاب در هر کدام از محدوده‌های معدنی به‌طور جداگانه بررسی می‌گردد:

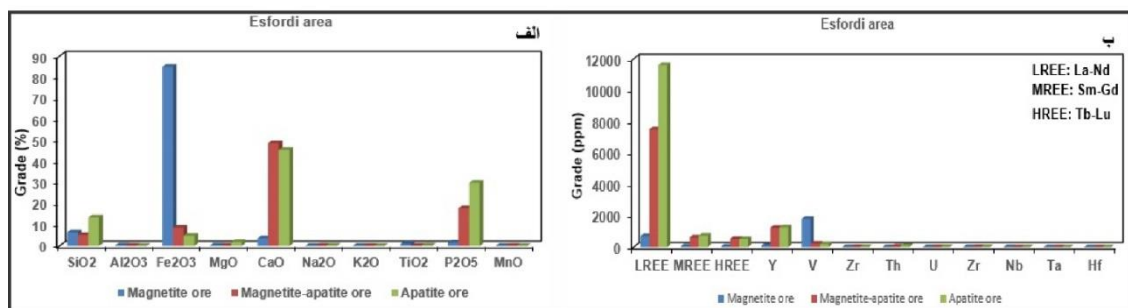
#### ۶-۱-۱-۲- تغییرات غلظت عناصر در محدوده اسفوردی

در محدوده‌ی معدنی اسفوردی تعداد ۵ نمونه برای تجزیه شیمیایی انتخاب شده است. از این میان تعداد ۱ نمونه از کانسنگ‌های غنی از مگنتیت (BE-G-04)، تعداد ۳ نمونه از کانسنگ‌های غنی از آپاتیت (BE-G-05، BE-G-06، BE-G-07) و ۱ نمونه از کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت (BE-G-03) می‌باشد. به‌طوریکه در نمودار (شکل ۶-۱ الف) مشخص است در نمونه‌های کانسنگ محدوده اسفوردی مقادیر غلظت اکسیدهای  $\text{CaO}$ ،  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ،  $\text{P}_2\text{O}_5$  و  $\text{SiO}_2$  در مقایسه با اکسید عناصر دیگر بالا است. مقدار  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  در کانسنگ مگنتیتی محدوده اسفوردی به دلیل درصد بالای مگنتیت خیلی بالا است و به عدد ۸۴/۹۶ درصد می‌رسد، و به سمت کانسنگ آپاتیتی با کاهش مقدار کانی مگنتیت، افت شدیدی در مقدار غلظت این اکسید (۴/۸۷ درصد) مشاهده می‌شود. مقدار غلظت  $\text{CaO}$  از ۳/۶۹ درصد در کانسنگ مگنتیتی تا ۴۸/۷۶ درصد در کانسنگ‌های آپاتیتی و مگنتیت-آپاتیتی در نوسان است و دلیل اصلی افزایش مقدار این اکسید در کانسنگ‌های آپاتیتی به‌خاطر حضور کانی‌های آپاتیت و کلسیت در آنها است. مقدار  $\text{P}_2\text{O}_5$  از ۱/۵۶ درصد در کانسنگ مگنتیتی، ۱۷/۸۲ درصد در کانسنگ مگنتیت-آپاتیت و ۳۵/۵۱ درصد در کانسنگ آپاتیتی تغییر می‌کند، و مقدار آن در ارتباط مستقیم با



وجود کانی آپاتیت است. مقدار  $\text{SiO}_2$  نیز به وسیله کوارتز و کانی‌های سنگ میزبان کنترل می‌گردد. کوارتز به‌عنوان یک فاز تاخیری به همراه کلسیت، کانی‌های مگنتیت و آپاتیت را همراهی می‌کند. متاسوماتیت‌ها که میزبان کانه‌زائی مگنتیت و آپاتیت در منطقه بافق هستند از دگرگونی متاسوماتیک سری ریزو (به‌ویژه گدازه و توف‌های ریولیتی) ایجاد شده و مقدار سیلیس نمونه‌ها را کنترل می‌نماید. مقادیر S در بخش مگنتیتی و آپاتیتی کانسار اسفوردی به ترتیب ۰/۰۲ و ۰/۰۷ درصد است. مطالعه تمرکز عناصر کمیاب در نمونه‌های محدوده اسفوردی نشان می‌دهد که مقادیر غلظت عناصر کمیاب خاکی، ایتریوم و وانادیوم در مقایسه با دیگر عناصر کمیاب در این نمونه‌ها بالا است (شکل ۵-۱۷ ب). مقدار عناصر کمیاب خاکی سبک (LREE: La-Nd) از ۷۰۸ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیتی، ۷۵۰۲ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت، تا ۱۱۵۹۵ گرم در تن در کانسنگ‌های آپاتیتی افزایش می‌یابد. مقدار عناصر کمیاب خاکی میانی (MREE: Sm-Gd) از ۵۵ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیتی، ۶۲۶ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت، تا ۷۳۳ گرم در تن در کانسنگ‌های آپاتیتی تغییر می‌نماید. مقدار عناصر کمیاب خاکی سنگین (HREE: Tb-Lu) از ۴۱ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیتی، ۵۳۰ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت، تا ۵۲۵ گرم در تن در کانسنگ‌های آپاتیتی تغییر می‌کند. به‌طور کلی، مجموع عناصر کمیاب خاکی (REE: La-Lu) از ۸۰۳ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیتی تا ۱۲۸۵۲ گرم در تن در کانسنگ‌های آپاتیتی محدوده اسفوردی افزایش نشان می‌دهد. بررسی مقادیر خام عناصر کمیاب خاکی حاکی است که کانسنگ‌های محدوده اسفوردی غنی از عناصر کمیاب خاکی سبک هستند. افزایش مقادیر REE از کانسنگ‌های مگنتیتی به آپاتیتی به دلیل وجود درصد بالایی از آپاتیت در کانسنگ‌های آپاتیتی به عنوان میزبان عناصر کمیاب خاکی است. زیرا مقداری از  $\text{Ca}^{2+}$  موجود در آپاتیت به وسیله REE جایگزین می‌شود، و این کانی حمل‌کننده اصلی REE در بیشتر سنگ‌ها و فرایندهای آذرین است. علاوه بر این، REE می‌توانند جایگزین کلسیم در کانی‌هایی از قبیل تیتانیت و آلانیت شود. از آنجایی که بار یونی REE بیشتر از  $\text{Ca}^{2+}$  است بنابراین REE به صورت اسیر شده به جای  $\text{Ca}^{2+}$  در ساختار

کانی‌های کلسیم‌دار قرار می‌گیرد (Mason and Moore, 1917). عنصر ایتريم (Y) نیز رفتاری مشابه REE دارد و مقدار غلظت آن از ۹۹ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیتی، ۱۲۳۷ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت، تا ۱۲۶۴ گرم در تن در کانسنگ‌های آپاتیتی تغییر می‌کند (شکل ۱-۶). مقدار عنصر وانادیوم (V) از ۱۸۲۰ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیتی، ۲۳۲ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت، به ۱۹۹ گرم در تن در کانسنگ‌های آپاتیتی کاهش می‌یابد (شکل ۱-۶). که این امر به دلیل درصد بالای مگنتیت در کانسنگ‌های مگنتیتی است. برای اینکه  $V^{3+}$  همبستگی و خویشاوندی ژئوشیمیایی بالایی با  $Fe^{3+}$  دارد و در طول تبلور ماگمایی جانشین  $Fe^{3+}$  در کانی‌های مگنتیت و تیتانومگنتیت می‌شود. وانادیم همچنین در کانی‌های آهن‌دار (پيروکسن‌ها، آمفیبول‌ها و بیوتیت) وارد می‌شود. از آنجایی که شعاع یونی  $V^{3+}$  بیشتر از  $Fe^{3+}$  است بنابراین وانادیم به صورت پذیرفته شده به جای آهن فریک در ساختار کانی‌های آهن‌دار قرار می‌گیرد (Mason and Moore, 1917).



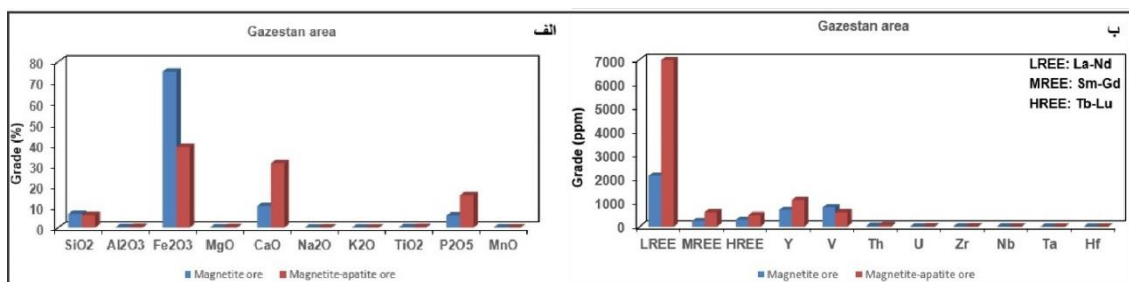
شکل ۱-۶: تغییرات مقادیر غلظت عناصر در کانسنگ‌های مگنتیتی، مگنتیت-آپاتیتی و آپاتیتی محدوده اسفوردی: الف) عناصر اصلی، ب) عناصر کمیاب و کمیاب خاکی.

### ۱-۱-۳- تغییرات غلظت عناصر در محدوده گزستان

در محدوده معدنی گزستان تعداد ۳ نمونه برای تجزیه شیمیایی انتخاب شده است. از این میان تعداد ۱ نمونه از کانسنگ‌های غنی از مگنتیت (BG-G-09) و ۲ نمونه از کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت (BG-G-11, 12) می‌باشد. به طوریکه در نمودار (شکل ۱-۶ الف) مشخص است. در نمونه‌های کانسنگ محدوده گزستان مقادیر غلظت اکسیدهای  $CaO$ ،  $Fe_2O_3$ ،  $P_2O_5$  و  $SiO_2$  در مقایسه با اکسید عناصر دیگر بالا است. مقدار  $Fe_2O_3$  در کانسنگ مگنتیتی محدوده گزستان به دلیل درصد

بالای مگنتیت خیلی بالا است و به عدد ۷۵/۲۹ درصد می‌رسد، و به سمت کانسنگ مگنتیت-آپاتیتی با کاهش مقدار کانی مگنتیت، مقدار غلظت این اکسید به طور متوسط به ۳۹ درصد کاهش می‌یابد. مقدار غلظت CaO از ۱۰/۵۲ درصد در کانسنگ مگنتیتی تا متوسط ۳۱ درصد در کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیتی تغییر می‌نماید، و دلیل اصلی افزایش مقدار این اکسید در کانسنگ‌های آپاتیتی به‌خاطر حضور کانی‌های آپاتیت و کلسیت در آنها است. مقدار  $P_2O_5$  از ۵/۸۴ درصد در کانسنگ مگنتیتی تا ۱۵/۶۳ درصد در کانسنگ مگنتیت-آپاتیتی افزایش می‌یابد، و مقدار آن در ارتباط مستقیم با وجود کانی آپاتیت است. مقدار  $SiO_2$  نیز به‌وسیله کوارتز و کانی‌های سنگ میزبان کنترل می‌گردد. کوارتز به‌عنوان یک فاز تاخیری به همراه کلسیت، کانی‌های مگنتیت و آپاتیت را همراهی می‌کند. مقادیر S در بخش مگنتیتی و مگنتیت-آپاتیتی کانسار گزستان به ترتیب ۰/۰۲ و ۰/۰۱۷ درصد است. مطالعه تمرکز عناصر کمیاب در نمونه‌های محدوده گزستان نشان می‌دهد که مقادیر غلظت عناصر کمیاب خاکی، ایتریوم و وانادیوم در مقایسه با دیگر عناصر کمیاب در این نمونه‌ها بالا است (شکل ۵-۱۸ ب). مقدار عناصر کمیاب خاکی سبک (LREE: La-Nd) از ۲۱۳۶ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیتی تا ۶۹۸۲ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت افزایش می‌یابد. مقدار عناصر کمیاب خاکی میانی (MREE: Sm-Gd) از ۲۳۳ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیت تا ۶۰۹ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت تغییر می‌نماید. مقدار عناصر کمیاب خاکی سنگین (HREE: Tb-Lu) از ۲۸۹ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیتی تا ۴۸۷ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت تغییر می‌کند. به‌طور کلی، مجموع عناصر کمیاب خاکی (REE: La-Lu) از ۲۶۵۹ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیتی تا ۸۰۷۸ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیتی محدوده گزستان افزایش نشان می‌دهد. بررسی مقادیر خام عناصر کمیاب خاکی حاکی است که کانسنگ‌های محدوده گزستان غنی از عناصر کمیاب خاکی سبک هستند. افزایش مقادیر REE از کانسنگ‌های مگنتیتی به آپاتیتی به‌دلیل وجود درصد بالایی از آپاتیت در کانسنگ‌های آپاتیتی است. عنصر ایتریوم (Y) نیز رفتاری مشابه REE دارد و مقدار غلظت آن از ۷۰۰ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیتی تا ۱۱۲۲

گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت غییر می‌کند (شکل ۶-۲ ب). مقدار عنصر وانادیوم (V) از ۸۱۸ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیتی تا ۶۰۶ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت کاهش می‌یابد (شکل ۶-۲ ب)، که این به دلیل درصد بالای مگنتیت در کانسنگ‌های مگنتیتی است. دلایل تغییرات مقادیر غلظت عناصر کمیاب میان کانسنگ‌های مگنتیت و مگنتیت-آپاتیت در مبحث محدوده اسفوردی به تفصیل بیان گردید.



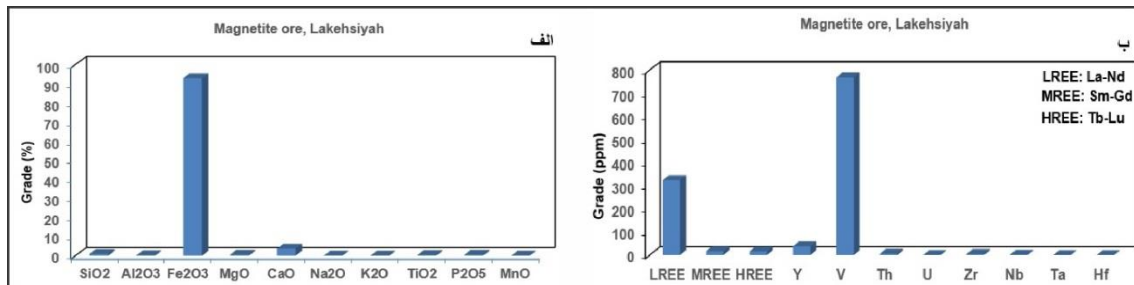
شکل ۶-۲: تغییرات مقادیر غلظت عناصر در کانسنگ‌های مگنتیتی و مگنتیت-آپاتیتی محدوده گزستان: الف) عناصر اصلی، ب) عناصر کمیاب و کمیاب خاکی.

#### ۶-۱-۱-۴- تغییرات غلظت عناصر در محدوده لکه‌سیاه

در محدوده‌ی معدنی لکه‌سیاه تعداد ۱ نمونه از کانسنگ‌های غنی از مگنتیت (BL-G-17) برای تجزیه شیمیایی انتخاب شده است. به‌طوریکه در نمودار شکل (۶-۳ الف) مشخص است در نمونه کانسنگ محدوده لکه‌سیاه مقادیر غلظت اکسیدهای Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و CaO در مقایسه با اکسید عناصر دیگر بالا است. مقدار Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در کانسنگ مگنتیتی محدوده گزستان به دلیل درصد بالای مگنتیت خیلی بالا است و به عدد ۹۳ درصد می‌رسد. مقدار غلظت CaO نیز ۳/۷۲ درصد است، که به دلیل وجود کانی‌های آپاتیت و کلسیت در آنها است. مقادیر P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> و S در بخش مگنتیتی کانسار لکه‌سیاه به ترتیب ۰/۴۷ و ۰/۰۲ درصد است.

مطالعه تمرکز عناصر کمیاب در نمونه محدوده لکه‌سیاه نشان می‌دهد که مقادیر غلظت عناصر کمیاب خاکی، ایتریوم و وانادیوم در مقایسه با دیگر عناصر کمیاب در این نمونه بالا است (شکل ۶-۳ ب). مقادیر عناصر LREE، MREE و HREE در کانسنگ مگنتیتی لکه‌سیاه به ترتیب ۳۲۴، ۱۷ و ۱۶

گرم در تن است. مقادیر عناصر ایتريم و وانادیم در بخش مگنتیتی به ترتیب ۳۹ و ۷۶۹ گرم در تن اندازه‌گیری شده است.

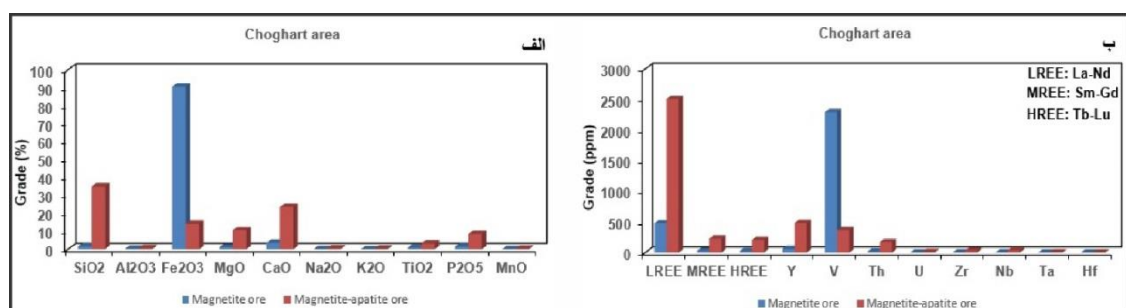


شکل ۳-۶: تغییرات مقادیر غلظت عناصر در کانسنگ مگنتیتی محدوده لکه‌سیاه: الف) عناصر اصلی، ب) عناصر کمیاب و کمیاب خاکی.

### ۶-۱-۱-۵- تغییرات غلظت عناصر در محدوده چغارت

در محدوده‌ی معدنی چغارت تعداد ۲ نمونه برای تجزیه شیمیایی انتخاب شده است. از این میان تعداد ۱ نمونه از کانسنگ‌های غنی از مگنتیت (BC-G-20) و ۱ نمونه از کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت (BC-G-19) می‌باشد. به‌طوریکه در نمودار شکل (۴-۶ الف) مشخص است در نمونه‌های کانسنگ محدوده گزستان مقادیر غلظت اکسیدهای  $CaO$ ،  $Fe_2O_3$ ،  $P_2O_5$ ،  $MgO$  و  $SiO_2$  در مقایسه با اکسید عناصر دیگر بالا است. مقدار  $Fe_2O_3$  در کانسنگ مگنتیتی محدوده چغارت به دلیل درصد بالای مگنتیت خیلی بالا است و به عدد ۹۱ درصد می‌رسد، و به سمت کانسنگ مگنتیت-آپاتیتی با کاهش مقدار کانی مگنتیت، مقدار غلظت این اکسید به ۱۴ درصد کاهش می‌یابد. مقدار غلظت  $CaO$  از ۳/۶ درصد در کانسنگ مگنتیتی تا ۲۳/۶ درصد در کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیتی تغییر می‌نماید، و دلیل اصلی افزایش مقدار این اکسید در کانسنگ‌های آپاتیتی به‌خاطر حضور کانی‌های آپاتیت و کلسیت در آنها است. مقدار  $P_2O_5$  از ۱/۵۱ درصد در کانسنگ مگنتیتی تا ۸/۵۳ درصد در کانسنگ مگنتیت-آپاتیتی افزایش می‌یابد، و مقدار آن در ارتباط مستقیم با وجود کانی آپاتیت است. مقادیر  $SiO_2$  و  $MgO$  نیز به‌وسیله کانی‌های سنگ میزبان کنترل می‌گردد. مقادیر S در بخش مگنتیتی و مگنتیت-آپاتیتی کانسار چغارت به ترتیب ۰/۷۵ و ۰/۰۵ درصد است.

مطالعه تمرکز عناصر کمیاب در نمونه‌های محدوده چغارت نشان می‌دهد که مقادیر غلظت عناصر کمیاب خاکی، ایتریوم و وانادیوم در مقایسه با دیگر عناصر کمیاب در این نمونه‌ها بالا است (شکل ۶-۴). مقدار عناصر کمیاب خاکی سبک (LREE: La-Nd) از ۴۸۰ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیتی تا ۲۵۰۸ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت افزایش می‌یابد. مقدار عناصر کمیاب خاکی میانی (MREE: Sm-Gd) از ۳۰ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیت تا ۲۲۹ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت تغییر می‌نماید. مقدار عناصر کمیاب خاکی سنگین (HREE: Tb-Lu) از ۲۴ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیتی تا ۲۰۹ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت تغییر می‌کند. به‌طور کلی، مجموع عناصر کمیاب خاکی (REE: La-Lu) از ۵۳۴ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیتی تا ۲۹۴۶ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیتی محدوده چغارت افزایش نشان می‌دهد. بررسی مقادیر خام عناصر کمیاب خاکی حاکی است که کانسنگ‌های محدوده چغارت غنی از عناصر کمیاب خاکی سبک هستند. عنصر ایتریوم (Y) نیز رفتاری مشابه REE دارد و مقدار غلظت آن از ۵۹ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیتی تا ۴۸۵ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت تغییر می‌کند (شکل ۶-۴). مقدار عنصر وانادیوم (V) از ۲۲۹۴ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیتی تا ۳۶۵ گرم در تن در کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت کاهش می‌یابد (شکل ۶-۴). دلایل تغییرات مقادیر غلظت عناصر کمیاب میان کانسنگ‌های مگنتیت و مگنتیت-آپاتیت در مبحث محدوده اسفوردی به تفصیل بیان گردید.



شکل ۶-۴: تغییرات مقادیر غلظت عناصر در کانسنگ‌های مگنتیتی و مگنتیت-آپاتیتی محدوده چغارت: الف) عناصر اصلی، ب) عناصر کمیاب و کمیاب خاکی.

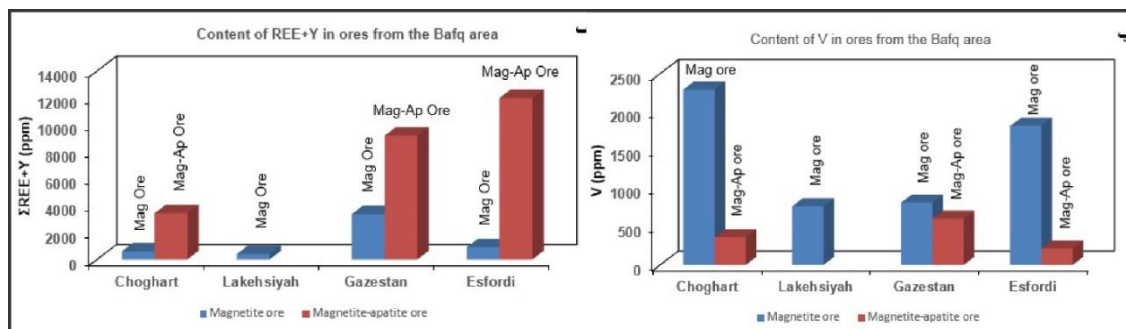
## ۶-۱-۱-۶- مقایسه غلظت عناصر آهن، فسفر، خاک‌های کمیاب و وانادیم در کانسارهای

### منطقه بافق

تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی نشان می‌دهد که  $Fe_2O_3$ ،  $P_2O_5$ ، REE و V از عناصر مهم معدنی در منطقه فلززائی بافق هستند. مقدار  $Fe_2O_3$  در کانسنگ مگنتیتی منطقه لکه‌سیاه دارای بیشترین عیار (۹۳ درصد) می‌باشد. کمترین مقدار  $Fe_2O_3$  در کانسنگ‌های غنی از مگنتیت در بین مناطق مذکور مربوط به گزستان (۷۳ درصد) است. مقادیر  $Fe_2O_3$  در کانسنگ‌های غنی از مگنتیت مناطق چغارت و اسفوردی به ترتیب ۹۱ و ۸۵ درصد می‌باشد. مقادیر متوسط  $P_2O_5$  نیز در کانسنگ‌های غنی از آپاتیت چغارت، گزستان و اسفوردی به ترتیب ۸/۵۳، ۱۵/۶۳ و ۲۹/۹۱ درصد است.

مجموع مقادیر عناصر کمیاب خاکی و ایتیریم در کانسنگ‌های غنی از آپاتیت منطقه فلززائی بافق بیشتر از انواع غنی از مگنتیت است (شکل ۵-۶ الف)، به طوریکه متوسط  $\Sigma REE+Y$  در کانسنگ‌های غنی از مگنتیت ۱۳۱۲ گرم در تن و در کانسنگ‌های غنی از آپاتیت ۹۱۶۰ گرم در تن برآورد می‌گردد. مقدار  $\Sigma REE+Y$  در کانسنگ‌های اسفوردی و گزستان بیشتر از چغارت و لکه‌سیاه است. مقدار  $\Sigma REE+Y$  در کانسنگ‌های مگنتیتی لکه‌سیاه، چغارت، اسفوردی و گزستان به ترتیب ۳۹۶، ۵۹۳، ۹۰۲ و ۳۳۵۹ گرم در تن است، و متوسط مقدار آن در کانسنگ‌های آپاتیتی چغارت، گزستان و اسفوردی به ترتیب ۳۴۳۱، ۹۱۹۹ و ۱۲۰۰۶ گرم در تن است (شکل ۵-۶ الف).

مقدار وانادیم در کانسنگ‌های غنی از مگنتیت منطقه فلززائی بافق بیشتر از انواع غنی از آپاتیت است (شکل ۵-۶ ب)، به طوریکه متوسط V در کانسنگ‌های غنی از مگنتیت ۱۴۲۵ گرم در تن و در کانسنگ‌های غنی از آپاتیت ۳۹۵ گرم در تن برآورد می‌گردد. مقدار  $\Sigma REE+Y$  در کانسنگ‌های چغارت و اسفوردی بیشتر از گزستان و لکه‌سیاه است. مقدار  $\Sigma REE+Y$  در کانسنگ‌های مگنتیتی لکه‌سیاه، گزستان، اسفوردی و چغارت به ترتیب ۷۶۹، ۸۱۸، ۱۸۲۰ و ۲۲۹۴ گرم در تن است، و مقدار آن در کانسنگ‌های آپاتیتی چغارت، گزستان و اسفوردی به ترتیب ۲۱۵، ۳۶۵ و ۶۰۶ گرم در تن است (شکل ۵-۶ ب).



شکل ۶-۵: مقایسه مقادیر عناصر کمیاب خاکی و وانادیم میان کانسنگ‌های مگنتیتی و مگنتیت-آپاتیتی منطقه بافق: الف) عناصر کمیاب خاکی، ب) وانادیم.

## ۶-۲- الگوهای به‌هنجار شده غلظت عناصر در نمونه‌های کانسنگ نسبت به نمونه‌های

### مرجع

در این بخش برای بررسی رفتار ژئوشیمیایی عناصر اصلی و کمیاب در طول فرایندهای زمین‌شناسی از قبیل ذوب بخشی، تبلور بخشی، دگرسانی، دگرگونی، متاسوماتیسم و هوازدگی، مقادیر غلظت عناصر در نمونه‌های کانسنگ منطقه فلززایی بافق نسبت به نمونه‌های مرجع به‌هنجار شده است. ترکیب گوشته اولیه (McDonough and Sun, 1995)، پوسته قاره‌ای بالایی (Taylor and McLennan, 1995) و کندریت (Boynnton, 1984) به عنوان نمونه‌های مرجع برای به‌هنجارسازی غلظت عناصر استفاده شده‌اند. در این قسمت برای اجتناب از حجم‌گرایی و تکرار مطالب، برای هر محدوده معدنی بر اساس تجزیه شیمیایی نمونه‌هایی که از کانسنگ‌های مگنتیتی، مگنتیت-آپاتیتی و آپاتیتی انتخاب شده است، متوسط مقدار غلظت عناصر محاسبه گردیده است. برای مثال در محدوده معدنی اسفوردی تعداد ۵ نمونه برای تجزیه شیمیایی انتخاب شده است، که ۱ نمونه از کانسنگ‌های غنی از مگنتیت (BE-G-04)، تعداد ۱ نمونه از کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت (BE-G-03) و ۳ نمونه از کانسنگ‌های غنی از آپاتیت (BE-G-05، BE-G-06، BE-G-07) می‌باشد، بر اساس نتایج این ۵ نمونه، متوسط مقادیر غلظت عناصر تحت عنوان کانسنگ مگنتیت-آپاتیت اسفوردی محاسبه شده و به عنوان نماینده کانسنگ‌های اسفوردی در نمودارهای به‌هنجار شده آورده شده است. برای محدوده‌های معدنی چغارت (۲ نمونه)، گزستان (۳ نمونه) و لکه‌سیاه (۱ نمونه) نیز بر اساس نتایج



تجزیه شیمیایی نمونه‌های کانسنگ، همانند محدوده اسفوردی متوسط مقادیر غلظت عناصر محاسبه شده و در نمودارهای به‌هنجار شده استفاده شده است (لازم به ذکر است که در بدو امر، نمودارهای به‌هنجار شده برای انواع مختلف کانسنگ‌ها (مگنتیتی، مگنتیت-آپاتیتی و آپاتیتی) و برای هر محدوده معدنی بطور جداگانه ترسیم گردید، از آنجایی که الگوهای به‌هنجار شده عناصر برای کانسنگ‌های همه محدوده‌ها یکنواخت بوده است، از اینرو برای تفسیر، مقایسه و نتیجه‌گیری بهتر روبه خلاصه‌سازی انجام پذیرفت). در مرحله بعدی، متوسط مقدار عناصر در کانسنگ مگنتیت-آپاتیت هر معدوده معدنی به نمونه‌های مرجع به‌هنجار شده است.

نمودارهای چندعنصری به‌هنجار شده، بر اساس گروه‌بندی عناصری هستند که نسبت به کانی‌شناسی تیپیک گوشته حالت ناسازگار دارند. این نمودارها در حقیقت همان نمودارهای عناصر کمیاب خاکی (REE) به‌هنجار شده به کندریت هستند که در آنها عناصر کمیاب دیگری به REE افزوده شده است. هر چند این نمودارهای بیشتر برای بازالت‌ها منظور شده‌اند، ولی از آنها در مورد تمام سنگ‌های آذرین و کانسنگ‌ها و بعضی از سنگ‌های رسوبی نیز استفاده می‌شود. در این نمودارها معمولاً از داده‌های گوشته و یا کندریت برای به‌هنجارسازی استفاده می‌شود که در واقع سنجشی برای انحراف از ترکیب اولیه است.

#### ۶-۲-۱- نمودارهای عنکبوتی و به‌هنجار شده به گوشته اولیه

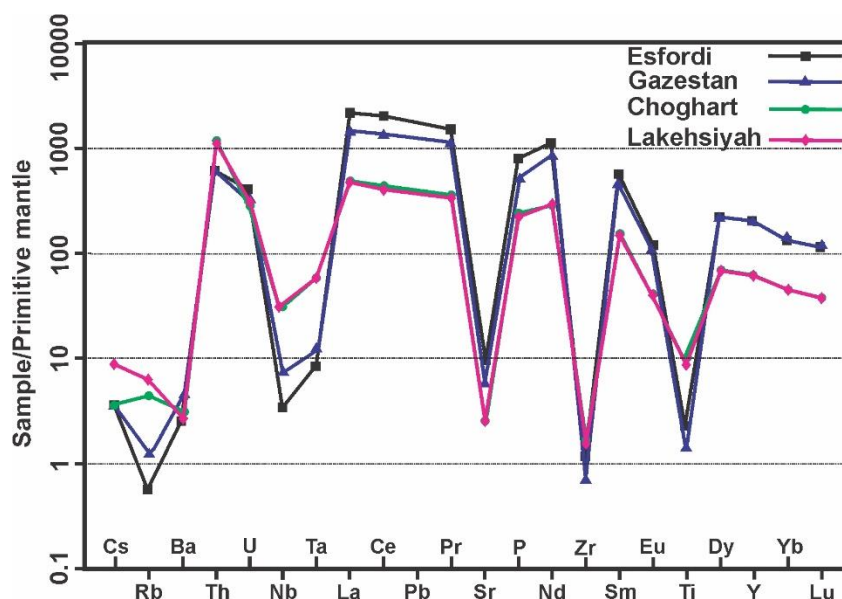
گوشته اولیه در حقیقت ترکیب گوشته قبل از تشکیل پوسته قاره‌ای است. در منطقه مورد مطالعه، متوسط ترکیب کانسنگ مگنتیت-آپاتیت محدوده‌های اسفوردی، چغارت، گزستان و لکه‌سیاه به ترکیب گوشته اولیه (McDonough and Sun, 1995) به‌هنجار شده است (شکل ۵-۲۲). در این نمودار ۲۲ عنصر بر اساس افزایش سازگاری و متناسب با درصد کم مذاب گوشته‌ای آرایش یافته‌اند، و مخلوط ناهمگنی از انواع عناصر کمیاب و کمیاب خاکی را در بر می‌گیرد. لذا تعداد پستی و بلندی‌های بیشتری در آنها دیده می‌شود که نشانگر رفتار متفاوت گروه‌های مختلف عناصر کمیاب است. در نمودار عنکبوتی (شکل ۶-۶)، کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت محدوده‌های اسفوردی، گزستان،

چغارت و لکه‌سیاه الگوهای کاملاً مشابهی دارند که نشان می‌دهد این کانسارها به احتمال زیاد تحت شرایط زمین‌شناسی، سنگ‌شناسی و تکتونیکی واحدی تشکیل شده‌اند. در این نمودار عناصر لیتوفیل با یون بزرگ (LILE: Cs, Rb, Ba, Sr) و عناصر با شدت میدان بالا (HFSE: Nb, Ta, Ti, Zr) رفتار ژئوشیمیایی کاملاً متفاوتی با REE، Y، Th، U و P نشان می‌دهند، و تهی‌شدگی عناصر LIL و HFS و غنی‌شدگی REE، Y، Th، U و P در آنها مشهود است.

غلظت عناصر کمیاب و کمیاب خاکی در سنگ و کانسنگ‌ها به وسیله شیمی سنگ منشاء و فرایندهای بلور/ مذاب که در حین تشکیل آنها صورت می‌گیرد، کنترل می‌شود. غلظت Zr به وسیله زیرکن، P توسط آپاتیت، Sr به وسیله پلاژیوکلاز و فلدسپات پتاسیم، Ba، Rb و Cs توسط بیوتیت و فلدسپات پتاسیم، و Nb، Ta و Ti توسط ایلمنیت، روتیل و اسفن کنترل می‌شود. بی‌هنجاری منفی Nb شاخص سنگ‌های قاره‌ای است و ممکن است نشان‌دهنده شرکت پوسته در فرایندهای ماگمایی باشد. غلظت REE در سنگ‌ها و کانسنگ‌ها به وسیله نرخ ذوب بخشی سنگ منشاء و نیز توسط کانی‌های الیوین (HREE)، ارتوپیروکسن (HREE)، کلینوپیروکسن (MREE و LREE)، هورنبلند (MREE)، فلدسپات (Eu و LREE)، گارنت (HREE) و فازهای فرعی مثل اسفن (MREE)، زیرکن (HREE)، آپاتیت (MREE و LREE)، آلانیت (LREE) و مونازیت (LREE) کنترل می‌شود. هر چند فراوانی فازهای فرعی در سنگ‌ها کمتر از ۱ درصد است ولی ضرایب جدایش بسیار بالایی دارند و می‌توانند تاثیر بسیار زیادی روی الگوی REE بگذارند (Rollinson, 1993).

تهی‌شدگی عناصر LIL (Cs, Rb, Ba, Sr) و HFS (Nb, Ta, Ti, Zr) در کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت منطقه مورد مطالعه به ترتیب به دلیل نبود و کمبود کانی‌های (پلاژیوکلاز، فلدسپات پتاسیم و بیوتیت) و (زیرکن، اسفن، روتیل و ایلمنیت) در ترکیب کانسنگ‌های منطقه می‌باشد. مطالعات کانی‌شناسی بر روی نمونه‌های مقاطع نازک-صیقلی و صیقلی پژوهش حاضر نیز گفته اخیر را تایید می‌نماید، و مگنتیت، آپاتیت، و هماتیت سازنده‌های اصلی این کانسنگ‌ها هستند. غنی‌شدگی REE، REE، Y، Th، U و P در کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت منطقه به دلیل وجود کانی آپاتیت است. علاوه بر

این، مطالعات ریزکوالکترونی بر روی کانسارهای مگنتیت-آپاتیت ناحیه معدنی بافق وجود کانی‌های آلانیت و مونازیت را در کانسنگ‌های غنی از آپاتیت نشان می‌دهد که تمرکز دهنده LREE هستند (Torab, 2008). بر اساس مدلی که برای تشکیل کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت منطقه فلززائی بافق در بخش پایانی این پژوهش ارائه شده است، می‌توان گفت که ماگمای مادر با ترکیب مافیکی آلکالن در نتیجه درجات پایین ذوب بخشی از گوشته غنی شده ایجاد شده است. در درجات پایین ذوب بخشی گوشته بالایی، عناصر ناسازگاری مانند REE (به ویژه LREE)، U، Th، و P وارد مذاب شده و گوشته را ترک می‌نمایند. در طول تبلور بخشی، ماگمای مادر مافیکی آلکالن غنی از عناصر ناسازگار به مذاب‌های غنی از سیلیس، مذاب‌های غنی از اکسیدهای آهن، مذاب‌های غنی از اکسیدهای آهن-فسفر و مذاب‌های غنی از فسفر تقسیم می‌شود. در طول این فرایند بخش عمده‌ای از عناصر LIL، HFS و بخشی کمی از MREE و HREE به همراه عناصر اصلی عموماً در مذاب‌های سیلیکاتی تمرکز می‌یابند و به ترتیب در ساختمان بلوری کانی‌های (پلاژیوکلاز، فلدسپات پتاسیم، و بیوتیت)، (زیرکن، اسفن، روتیل و ایلمنیت)، و (الیوین، اورتوپیروکسن، کلینوپیروکسن و هورنبلند) در سنگ‌های آذرین فلسیک تا مافیک منطقه بافق وارد می‌شوند، در حالیکه بخش عمده‌ای از عناصر ناسازگاری مانند REE (به ویژه LREE)، U، Th، و P در مذاب‌های غنی از آهن-فسفر و غنی از فسفر غنی می‌شوند و در ساختمان بلوری کانی‌های آپاتیت، مونازیت، آلانیت و ... تمرکز می‌یابند.

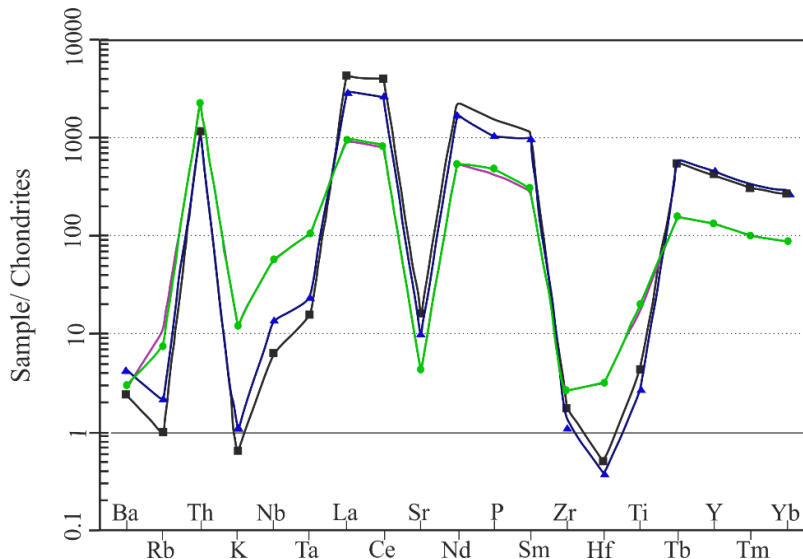


شکل ۶-۶: الگوی به‌هنجار شده غلظت عناصر کمیاب و کمیاب خاکی متوسط کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت اسفوردی، گزستان، چغارت و لکه‌سیاه به ترکیب گوشته اولیه (McDonough and Sun, 1995).

#### ۶-۲-۲- نمودارهای عنکبوتی و به‌هنجار شده به کندریت

تامپسون (Thompson, 1982) پیشنهاد کرد که در تهیه نمودارهای عنکبوتی، داده‌ها بهتر است نسبت به کندریت به‌هنجار شوند، چرا که ترکیب کندریت‌ها مستقیماً اندازه‌گیری شده در صورتی که ترکیب گوشته اولیه تخمینی است. در منطقه مورد مطالعه، متوسط ترکیب کانسنگ مگنتیت-آپاتیت محدوده‌های اسفوردی، چغارت، گزستان و لکه‌سیاه به ترکیب کندریت (Thompson, 1982) به‌هنجار شده است (شکل ۶-۷). در این نمودار ۱۹ عنصر بر اساس افزایش سازگاری از چپ به راست آرایش یافته‌اند، و مخلوط ناهمگنی از انواع عناصر، اصلی، کمیاب و کمیاب خاکی را در بر می‌گیرد. لذا تعداد پستی و بلندی‌های بیشتری در آنها دیده می‌شود که نشانگر رفتار متفاوت گروه‌های مختلف عناصر است. در نمودار عنکبوتی (شکل ۶-۷)، کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت محدوده‌های معدنی اسفوردی، گزستان، چغارت و لکه‌سیاه الگوهای کاملاً مشابهی دارند که نشان می‌دهد این کانسارها به احتمال زیاد تحت شرایط زمین‌شناسی، سنگ‌شناسی و تکتونیکی واحدی تشکیل شده‌اند. در این نمودار عناصر لیتوفیل با یون بزرگ (LILE: Ba, Rb, K, Sr) و عناصر با شدت میدان بالا (HFSE: Nb, Ta, ) رفتار ژئوشیمیایی کاملاً متفاوتی با REE, Y, Th و P نشان می‌دهند، و تهی‌شدگی

عناصر LIL و HFS و غنی‌شدگی REE، Y، Th و P در آنها مشهود است، که دلایل آن در تفسیر الگوی به‌هنجار شده نمونه‌ها به گوشته اولیه (شکل ۵-۲۲) توصیف گردید.

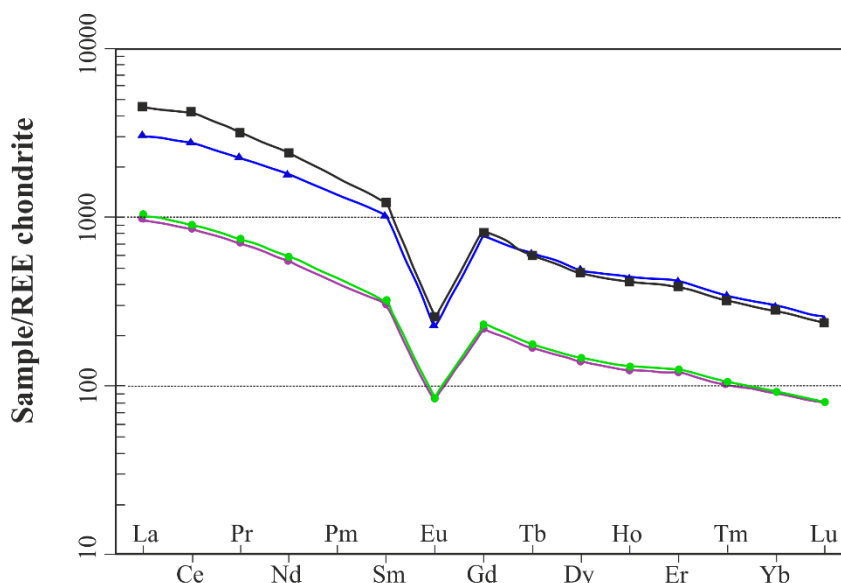


شکل ۶-۷: الگوی به‌هنجار شده غلظت عناصر اصلی، کمیاب و کمیاب خاکی متوسط کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت اسفوردی، گزستان، چغارت و لکه‌سیاه به کندریت (Thompson, 1982). علائم بکار رفته برای نشان دادن کانسنگ‌ها همانند شکل ۶-۶ است.

در نمودار (شکل ۶-۸) متوسط غلظت عناصر کمیاب خاکی کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت محدوده‌های اسفوردی، چغارت، گزستان و لکه‌سیاه به ترکیب کندریت (Boynton, 1984) به‌هنجار شده است. به طوریکه در این نمودار مشخص است مقادیر غلظت عناصر کمیاب خاکی کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت اسفوردی و گزستان به مراتب بیشتر از کانسنگ‌های چغارت و لکه‌سیاه است، که این به دلیل درصد بالای فازهایی مثل آپاتیت، مونازیت، آلانیت و ... در کانسارهای اسفوردی و گزستان است. علاوه بر این، الگوی نمودارهای عنکبوتی توزیع عناصر کمیاب خاکی در کانسنگ‌های هر چهار محدوده روند یکسانی داشته و دارای شیب منفی هستند و نشانگر غنی‌شدگی در LREE نسبت به HREE، و دارای بی‌هنجاری منفی می‌باشند (شکل ۶-۸). الگوهای REE در یک سنگ آذرین به وسیله شیمی REE منشاء آن سنگ و تعادل بلور-مذاب که در طول تکامل آن سنگ رخ داده، کنترل می‌شود. بی‌هنجاری‌های Eu اغلب به وسیله فلدسپات‌ها (به ویژه در ماگمای فلسیک) کنترل می‌شوند، زیرا Eu در حالت دو ظرفیتی در پلاژیوکلاز و فلدسپات پتاسیم سازگار است در حالی که سایر REE سه

ظرفیتی ناسازگار هستند. بنابراین جدا شدن فلدسپات از مذاب فلسیک چه به وسیله تفریق بلوری و چه به علت ذوب بخشی (که در آن فلدسپات در تفرقه باقی می ماند) باعث پیدایش آنومالی منفی Eu در مذاب می شود (Rollinson, 1993). بی هنجاری منفی Eu به همراه غنی شدگی LREE از مشخصه های آپاتیت های موجود در کانسنگ های آهن تپ کایرونا است (Jinjie et al., 2007). وجود این بی هنجاری منفی می تواند نشانگر منشا گرفتن سنگ های مورد مطالعه از یک منبع محتوی پلاژیوکلاز نیز باشد (Andreoli et al., 1994). تهی شدگی Eu در کانسارهای تپ کایرونا می تواند در اثر تبلور فلدسپارها از ماگمای مادر در نزدیکی سطح و یا اینکه در اثر اکسیده بودن محیط به دلیل وجود مگنتیت و هماتیت باشد (Frietsch and Perdahl, 1995).

در منطقه فلززائی بافق به دلیل سیال متاسوماتیک غنی از عناصر خاکی کمیاب که از گوشته منشا گرفته است به بخش های غنی از سیلیس و غنی از آهن و فسفر تقسیم می شود. عنصر Eu به بخش غنی از سیلیس وارد می شود و در فرایند تبلور مذاب غنی از سیلیس این عنصر در ساختمان بلوری پلاژیوکلاز سنگ های مافیک تمرکز می یابد و به همین خاطر در سنگ های مافیک منطقه فلززائی بافق عنصر Eu بی هنجاری مثبت نشان می دهد و به سمت سنگ های حدواسط و فلسیک بی هنجاری آن منفی می گردد. از اینرو غنی شدگی REE (به ویژه LREE و MREE) و فقیر شدگی Eu در کانسنگ های مگنتیت-آپاتیت (به ویژه کانسنگ های غنی از آپاتیت) منطقه فلززائی بافق توجیه می گردد. در مذاب های غنی از فسفر، فازهایی مثل آپاتیت، آلانیت و مونازیت به دلیل ضرایب جدایش بسیار بالایی که دارند تاثیر بسیار زیادی روی الگوی REE مذاب دارند، آپاتیت MREE را بیش از LREE و HREE جدا کرده، و مونازیت و آلانیت نیز باعث فقیر شدن مذاب از LREE می شوند.

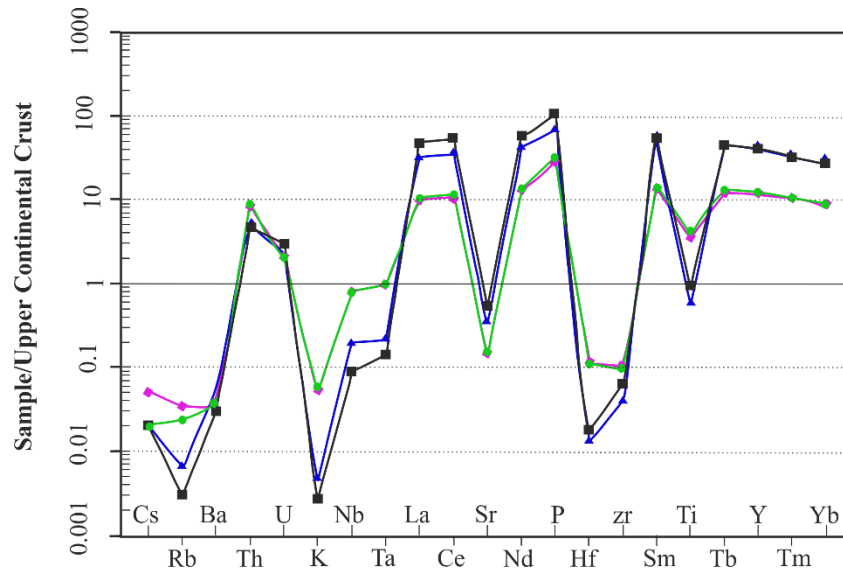


شکل ۶-۸: الگوی به‌هنجار شده غلظت عناصر کمیاب خاکی متوسط کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت اسفوردی، گزستان، چغارت و لکه‌سیاه به کندریت (Boynton, 1984). علائم بکار رفته برای نشان دادن کانسنگ‌ها همانند شکل ۶-۶ است.

### ۶-۲-۳- نمودارهای عنکبوتی به‌هنجار شده به پوسته قاره‌ای بالایی

در منطقه مورد مطالعه، متوسط ترکیب کانسنگ مگنتیت-آپاتیت محدوده‌های اسفوردی، چغارت، گزستان و لکه‌سیاه به ترکیب پوسته قاره‌ای بالایی (Taylor and McLennan, 1995) به‌هنجار شده است (شکل ۶-۹). در این نمودار ۲۱ عنصر بر اساس افزایش سازگاری از چپ به راست آرایش یافته‌اند، و مخلوط ناهمگنی از انواع عناصر، اصلی، کمیاب و کمیاب خاکی را در بر می‌گیرد. لذا تعداد پستی و بلندی‌های بیشتری در آنها دیده می‌شود که نشانگر رفتار متفاوت گروه‌های مختلف عناصر است. در نمودار عنکبوتی (شکل ۶-۹)، کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت محدوده‌های معدنی اسفوردی، گزستان، چغارت و لکه‌سیاه الگوهای کاملاً مشابهی دارند که نشان می‌دهد این کانسارها به احتمال زیاد تحت شرایط زمین‌شناسی، سنگ‌شناسی و تکتونیکی واحدی تشکیل شده‌اند. در این نمودار عناصر لیتوفیل با یون بزرگ (LILE: Cs, Ba, Rb, K, Sr) و عناصر با شدت میدان بالا (HFSE: Nb, Ta, Ti, Zr, Hf) رفتار ژئوشیمیایی کاملاً متفاوتی با REE، Y، Th، U و P نشان می‌دهند، و تهی‌شدگی عناصر LIL و HFS و غنی‌شدگی REE، Y، Th و P در آنها مشهود است. بنابراین به دلیل

غلظت بالای این عناصر منشا عناصر خاکی کمیاب از گوشته می‌باشد و نه از پوسته بالایی که دلایل آن در تفسیر الگوی به‌هنجار شده نمونه‌ها به گوشته اولیه (شکل ۶-۶) توصیف گردیده است.



شکل ۶-۹: الگوی به‌هنجار شده غلظت عناصر اصلی، کمیاب و کمیاب خاکی متوسط کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت اسفوردی، گزستان، چغارت و لکه‌سیاه به پوسته قاره‌ای بالایی (Taylor and McLennan, 1995). علائم بکار رفته برای نشان دادن کانسنگ‌ها همانند شکل ۶-۶ است.

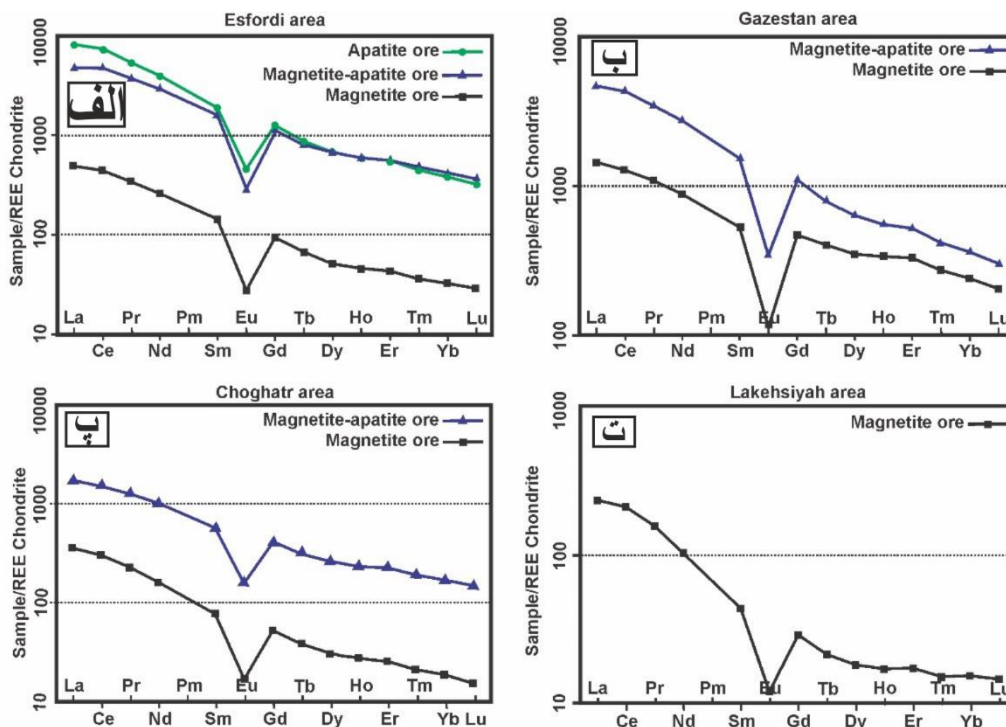
#### ۶-۲-۴- الگوی به‌هنجار شده عناصر کمیاب خاکی کانسنگ‌های منطقه فلززائی بافق به

#### کندريت

در نمودارهای شکل (۶-۱۰ الف-ت)، غلظت عناصر کمیاب خاکی در کانسنگ‌های آپاتیت، مگنتیت-آپاتیت، و مگنتیت هر یک از محدوده‌های اسفوردی، گزستان، چغارت، و لکه‌سیاه به طور جداگانه به ترکیب کندريت (Boynnton, 1984) به‌هنجار شده است. به‌طوریکه در این نمودارها مشخص است مقادیر غلظت عناصر کمیاب خاکی از کانسنگ‌های مگنتیت، مگنتیت-آپاتیت به سمت کانسنگ‌های آپاتیت افزایش می‌یابد، و غلظت این عناصر در کانسنگ‌های اسفوردی و گزستان به مراتب بیشتر از کانسنگ‌های چغارت و لکه‌سیاه است، که این به دلیل درصد بالای فازهایی مثل آپاتیت، موناژیت، آلانیت در کانسنگ‌های آپاتیتی و مگنتیت-آپاتیتی مناطق اسفوردی و گزستان است. علاوه بر این، الگوی نمودارهای عنکبوتی توزیع عناصر کمیاب خاکی در کانسنگ‌های مختلف در هر چهار محدوده روند یکسانی داشته و دارای شیب منفی هستند و نشانگر غنی‌شدگی از LREE نسبت به HREE، و دارای بی‌هنجاری منفی Eu می‌باشند. در کانسنگ‌های غنی از فسفر، وجود فازهای کانیایی مثل



آپاتیت، آلانیت و مونازیت به دلیل ضرایب جدایش بسیار بالایی که دارند تاثیر بسیار زیادی روی الگوی REE مذاب دارند، آپاتیت MREE را بیش از LREE و HREE جدا کرده، و مونازیت و آلانیت نیز باعث فقیر شدن مذاب از LREE می‌شوند، که عامل اصلی غنی‌شدگی REE در کانسنگ‌های آپاتیته منطقه فلززائی بافق می‌باشند.



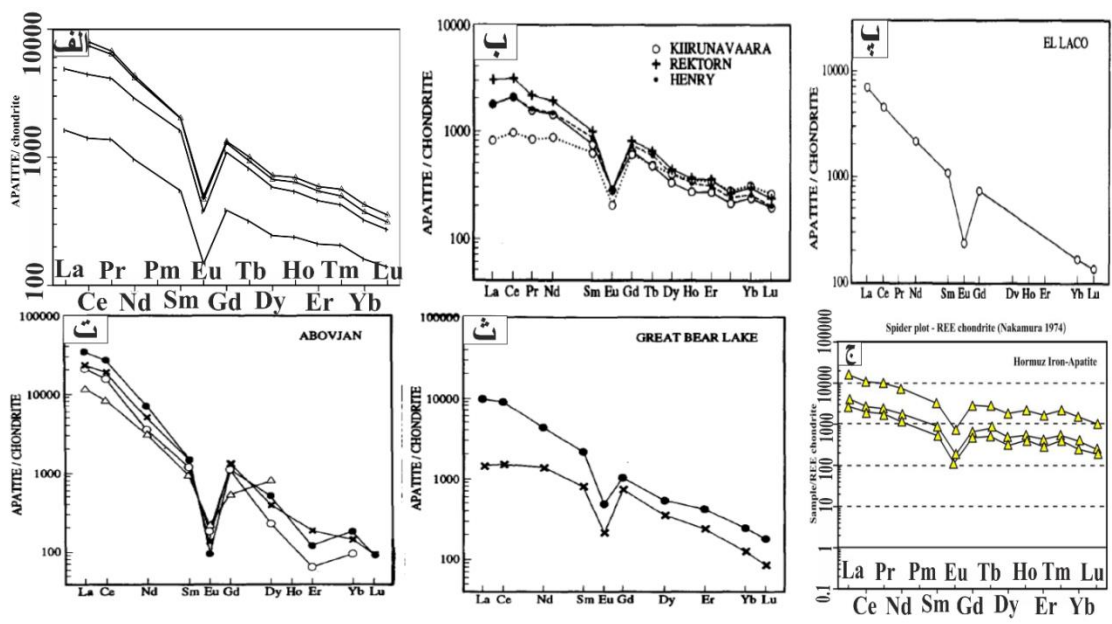
شکل ۶-۱۰: الگوی به‌هنجار شده غلظت عناصر کمیاب خاکی کانسنگ‌های آپاتیته، مگنتیت-آپاتیته و مگنتیته بافق به کندریت (Boynton, 1984): الف) اسفوردی، ب) گزستان، پ) چغارت، ت) لکه‌سیاه.

## ۶-۲-۵- مقایسه الگوی توزیع مقایسه الگوی توزیع عناصر کمیاب خاکی کانسنگ‌های

### مگنتیت-آپاتیت منطقه بافق با کانسارهای مشابه در جهان

یکی از ویژگی‌های اصلی کانسارهای مگنتیت-آپاتیت تیپ کایرونا وجود درصد بالایی از عناصر کمیاب خاکی در آن‌ها است. عناصر کمیاب خاکی در این تیپ از کانسارها به‌صورت جانشینی عنصر کلسیم در ساختار آپاتیت و به‌صورت میانبارهای مونازیت در آپاتیت وجود دارد (Frietsch and Perdahl, 1995). توزیع آپاتیت کانسارهای مختلف به عواملی همچون ترکیب و منشاء سنگ‌های دربرگیرنده آن‌ها بستگی دارد. بلورهای آپاتیت محدوده وسیعی از تغییرات شیمیایی مربوط به محیطی را که در آن شکل گرفتند نشان می‌دهند. در کانی آپاتیت، عناصر فلئوئور، کلر، هیدروکسیل و کربنات می‌توانند

جانشین یکدیگر شوند. REE در آپاتیت جانشین  $Ca^{2+}$  شده و نقشی مهم برای توزیع REE در کانسنگ و سنگ بازی می‌کند (Frietsch and Perdahl, 1995). الگوی توزیع REE آپاتیت‌ها را در انواع محیط‌ها و کانسارهای مختلف بررسی و مقایسه کرده، که در زیر به‌طور خلاصه به آن پرداخته می‌شود. ماگماهای گوناگون با ترکیبات مختلف دارای الگوهای مختلف REE می‌باشند. کانی آپاتیت در نفوذی‌های آلکان و کربناتیت‌ها، غنی از REE است. میزان REE در آن‌ها به چند درصد می‌رسد. به‌طوری که جدایش قوی از LREE/HREE را نشان می‌دهد. الگوی تغییرات عناصر کمیاب خاکی به‌هنجار شده به کندریت (Boynton, 1984) برای نمونه‌های برداشت شده از انواع کانسنگ‌های مربوط به کانه‌زایی مگنتیت-آپاتیت منطقه مورد مطالعه، غنی‌شدگی LREE/HREE و بی‌هنجاری منفی مشخص Eu را نشان می‌دهند (شکل ۶-۱۱ الف). تهی‌شدگی Eu در کانسارهای آهن نوع کایرونا ناشی از اکسایش محیط به دلیل وجود مگنتیت و هماتیت، و یا جانشینی Eu به جای Ca و Sr به دلیل تشابه شعاع یونی باشد (Frietsch and Perdahl, 1995). مقایسه الگوی توزیع عناصر کمیاب خاکی در کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت منطقه بافق (اسفوردی، گزستان، چغارت، و لکه‌سیاه) با کانه‌زایی اکسید آهن-آپاتیت جزیره هرمز بیانگر همانندی کامل آن‌ها با یکدیگر است (شکل‌های ۶-۱۱ الف، ج). از سوی دیگر، مقایسه الگوی توزیع عناصر کمیاب خاکی کانسارهای منطقه فلززائی بافق با کانسارهای نوع کایرونا در جهان (شامل کایرونا، رکتون، هنری، ال‌لاکو، آبوجان، و گریت بیر لیک) شباهت میان آن‌ها را نشان می‌دهد (شکل‌های ۶-۱۱ ب تا ث). همه نمونه‌های مورد مطالعه یک الگوی غنی از LREE با نسبت بالای LREE/HREE را همراه با بی‌هنجاری منفی مشخص در Eu نشان می‌دهند که از ویژگی‌های شاخص کانسارهای مگنتیت-آپاتیت نوع کایرونا است.

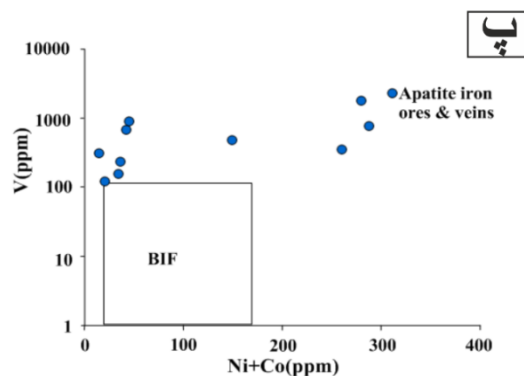
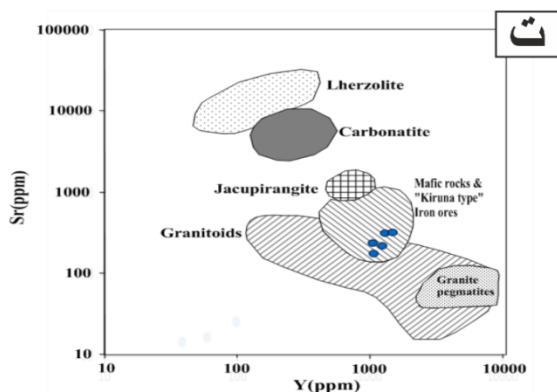
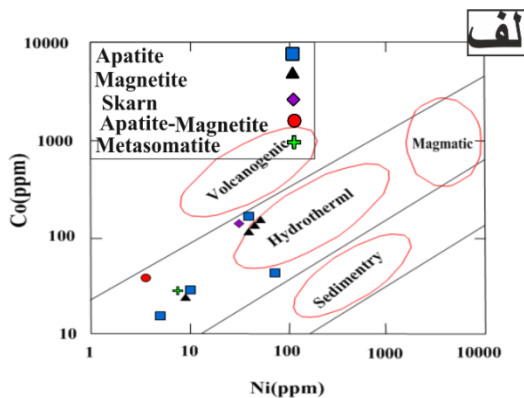
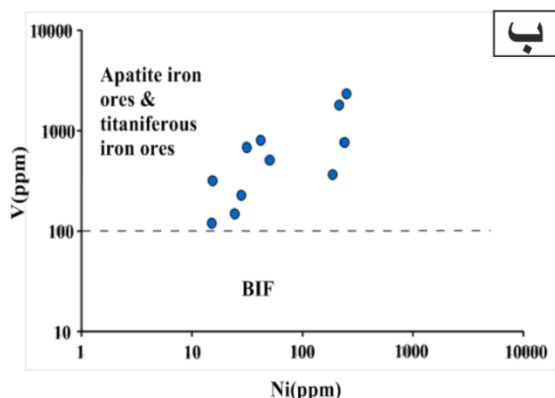


شکل ۶-۱۱: الگوی به‌هنجار شده عناصر کمیاب خاکی در کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت: الف) کانه‌زایی‌های مگنتیت-آپاتیت منطقه بافق، ب) کانسارهای کایرونوآوارا، رکتون و هنری، شمال سوئد (Frietsch and Perdahl, 1995)، پ) کانسار ال لاکو در شیلی (Frietsch and Perdahl, 1995)، ت) کانسار آبوجان در روسیه (Saruchanjan and Frietsch and Perdahl, 1995)، ث) کانسار ترا در کانادا (Frietsch and Perdahl, 1995)، ج) کانه‌زایی اکسید آهن-آپاتیت جنوب غرب جزیره هرمز (فخری دودویی، ۱۳۹۷).

### ۶-۳- بررسی نسبت‌های عنصری در کانسنگ‌های منطقه بافق

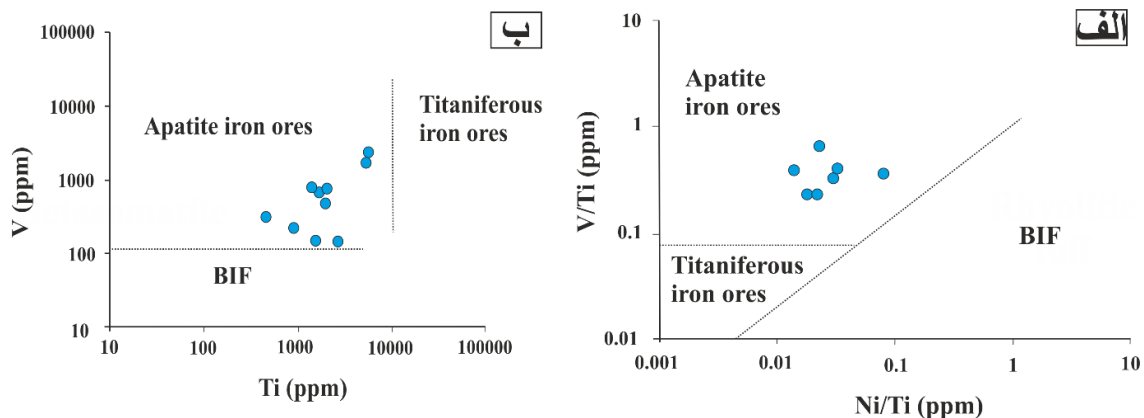
بررسی ژئوشیمیایی کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت منطقه فلززائی بافق در نمودار Ni برحسب Co نشان می‌دهد که کانه‌زایی منشا ماگمایی-گرمایی دارد. کبالت و نیکل از نظر شعاع یونی نزدیک به آهن می‌باشند و جانشین این فلز در ترکیبات آهن‌دار می‌شود، به طوری که نسبت Ni/Co در جریان تفریق ماگمایی کاهش می‌یابد. نسبت Ni/Co در سیالات ماگمایی-گرمایی ۰/۲-۷ و در کانسنگ‌های منطقه مورد مطالعه ۰/۵-۲ می‌باشد که دال بر منشا ماگمایی-گرمایی کانسارهای مگنتیت-آپاتیت منطقه دارد. در نمودار Co در مقابل Ni (Bajwah et al., 1987) نمونه‌های منطقه مورد مطالعه در محدوده ذخایر ماگمایی-گرمایی قرار می‌گیرند (شکل ۶-۱۲ الف). برخی از محققین بر اساس شیمی کانه مگنتیت، نمودارهایی ارائه داده‌اند که برخی از انواع کانسارهای آهن را از یکدیگر متمایز می‌کند. لوبرگ و هورندال (Loberg and Horndahl, 1983) بر اساس مقادیر Ni, V, Ti و Fe که عناصر گروه

آهن نامیده می‌شوند و نیز نسبت‌های عناصر مذکور، کانسارهای آهن پرکامبرین سوئد را به سه گروه آپاتیت‌دار، تیتانیوم‌دار و تشکیلات آهن نواری تقسیم کرده‌اند. در شکل (۶-۱۲ ب) نسبت V به Ni، کانسارهای آهن را به دو گروه عمده تقسیم کرده است. بر این اساس، کانسارهای نوع آپاتیت‌دار و تیتانیوم‌دار در یک محدوده واقع شده و قابل تفکیک نمی‌باشند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نمونه‌های کانسنگ‌های مگنتیت منطقه مورد مطالعه عمدتاً در محدوده کانسارهای آپاتیت‌دار و تیتانیوم‌دار واقع شده‌اند. نایستروم و هنری کوئیز (Nystroem and Henriquez, 1994) بر اساس میزان V و (Ni+Co) کانسنگ‌ها و رگه‌های آپاتیت‌دار را از سازندهای آهن نواری جدا کرده‌اند (شکل ۶-۱۲ پ). در این شکل می‌توان مشاهده کرد نمونه‌های منطقه مورد مطالعه عمدتاً در محدوده کانسارهای آهن آپاتیت‌دار قرار می‌گیرند. یکی از نمونه‌ها در مرز BIF قرار گرفته است. بر اساس نمودار Sr در مقابل Y می‌توان محدوده‌های ترکیبی مشخصی از آپاتیت‌ها را برای گروه‌های مختلف سنگی مشخص کرد (شکل ۶-۱۲ ت). نسبت Sr در برابر Y شامل محدوده گسترده‌ای است که همبستگی شدیدی دارند چرا که با افزایش درجه تفریق ماگمایی میزان Sr کاهش اما میزان Y افزایش می‌یابد. میزان Sr در آپاتیت‌های منطقه مورد مطالعه نسبتاً بالا است که می‌تواند به علت عدم تفریق فازهای جمع‌کننده این عنصر مثل پلاژیوکلاز و همچنین آرایش با سنگ‌های پوسته‌ای در حین صعود ماگما باشد.

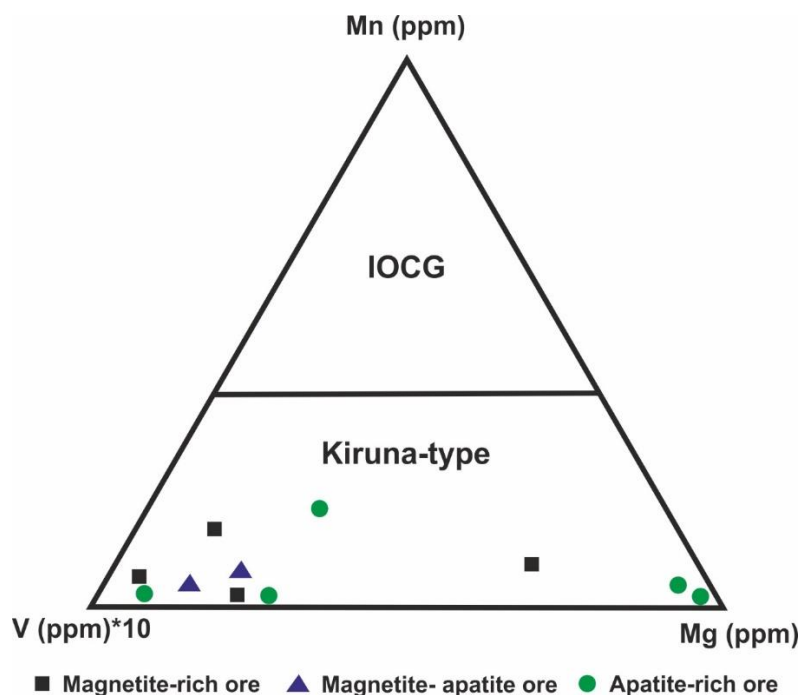


شکل ۶-۱۲: الف) نمودار Co در مقابل Ni (Bajwah et al., 1987) ب) موقعیت کانسنگ‌های منطقه مورد مطالعه در نمودار V در مقابل Ni (Loberg and Horndahl, 1983). پ) موقعیت نمونه‌های منطقه مورد مطالعه در نمودار V نسبت به Ni+Co (Nystroem and Henriquez, 1994). ت) موقعیت نمونه‌های آپاتیت منطقه مورد مطالعه در نمودار Y نسبت به Sr (Belousova et al., 2002)

در شکل (۶-۱۳) عنصر V در مقابل Ti ملاک طبقه‌بندی قرار داده شده است. براساس این شکل می‌توان دریافت که مگنتیت‌های منطقه فلزایی بافق از لحاظ نسبت V/Ti همگی در محدوده کانسارهای نوع آپاتیت‌دار قرار می‌گیرند. در شکل (۶-۱۳) الف) از نسبت برخی از عناصر برای تشخیص نوع کانسار آهن استفاده شده است. در محور افقی نمودار نسبت Ni/Ti و در محور قائم نسبت V/Ti قرار گرفته است. همانگونه که در شکل قابل رویت است، نمونه‌های منطقه مورد مطالعه در محدوده کانسارهای آهن نوع آپاتیت‌دار قرار می‌گیرند.

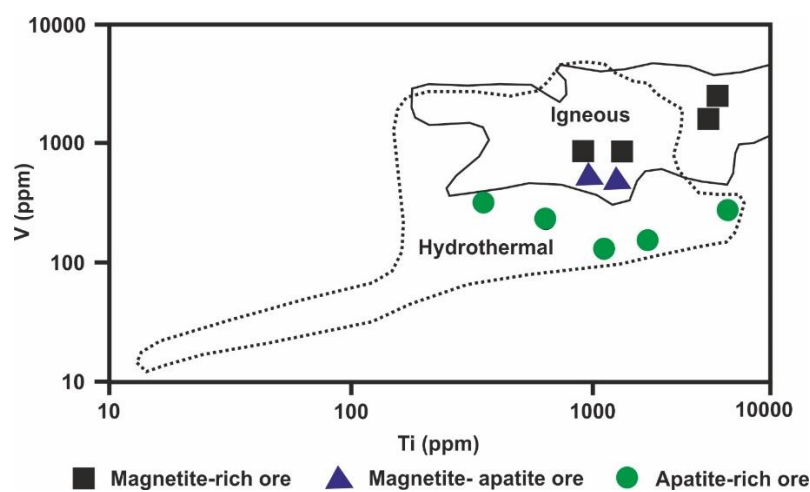


شکل ۶-۱۳: الف) موقعیت مگنتیت‌های منطقه در نمودار Ni/Ti نسبت به V/Ti (Loberg and Horndahl, 1983)،  
 ب) موقعیت مگنتیت‌های منطقه در نمودار V در مقابل Ti (Loberg and Horndahl, 1983)  
 در نمودار مثلثی Mg-V-Mn که مرز میان کانسارهای آهن-آپاتیت نوع کایرونا (IOA) و کانسارهای  
 اکسید آهن-مس-طلا (IOCG) را بر پایه شیمی کانی آپاتیت نشان می‌دهد (Mao et al., 2016).  
 کانسنگ‌های اکسید آهن-آپاتیت منطقه فلززائی بافق در این نمودار در میدان کانسارهای نوع کایرونا  
 قرار گرفته‌اند (شکل ۶-۱۴). مقادیر Mn در آپاتیت‌های منطقه معدنی بافق کمتر از نوع IOCG  
 هستند و بیانگر شباهت کانسارهای منطقه فلززایی بافق به سیستم‌های نوع کایرونا می‌باشد  
 (Heidarian et al., 2018).



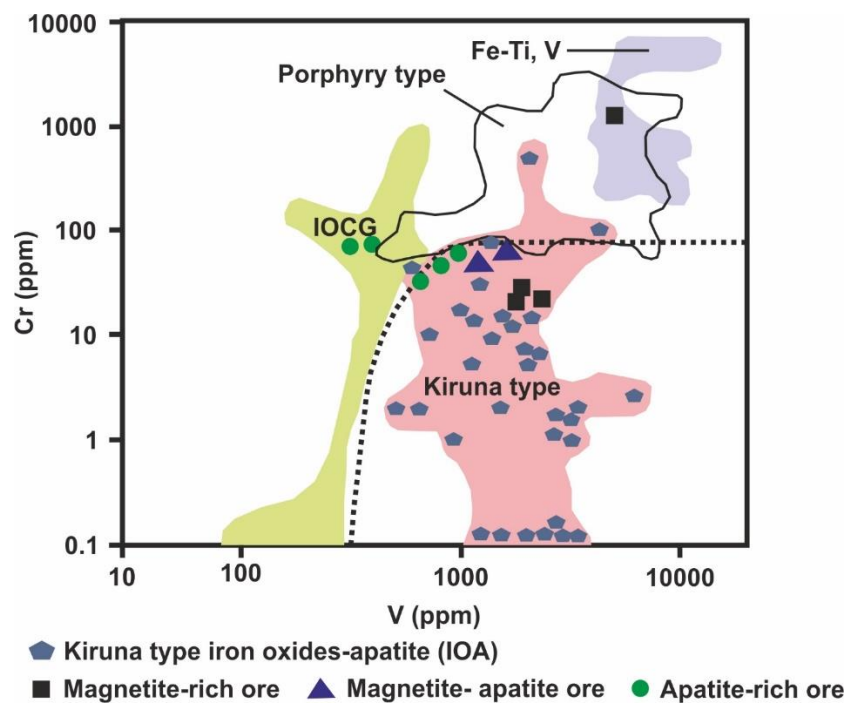
شکل ۶-۱۴: نمودار مثلثی Mg-V-Mn که مرز میان کانسارهای آهن-آپاتیت نوع کایرونا (IOA) و کانسارهای اکسید  
 آهن-مس-طلا (IOCG) نشان می‌دهد (Mao et al., 2016).

در نمودار غلظت V در برابر Ti (Nadoll et al., 2015) با محدوده‌هایی که برای کنسارهای آهن-آپاتیت با منشا آذرین و گرمابی پیشنهاد شده است (Knipping et al., 2015). در این نمودار مرز میان کنسارهای آهن-آپاتیت ماگمایی و گرمابی بر پایه شیمی کانی مگنتیت تعریف شده است. کانسنگ‌های غنی از مگنتیت، و مگنتیت-آپاتیت منطقه فلززائی بافق به ترتیب در میدان کنسارهای اکسید آهن-آپاتیت با منشا ماگمایی و ماگمایی-گرمابی، و کانسنگ‌های غنی از آپاتیت در میدان کنسارهای با منشا گرمابی قرار گرفته‌اند (شکل ۶-۱۵).



شکل ۶-۱۵: نمودار غلظت V در برابر Ti (Nadoll et al., 2015)

در نمودار متمایز کننده انواع کنسارهای آهن بر اساس غلظت‌های V در برابر Cr (Knipping et al., 2015; Rojas et al., 2018). در این نمودار مرز میان انواع کنسارهای آهن بر پایه شیمی کانی مگنتیت تعریف شده است (شکل ۶-۱۶). کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت منطقه فلززائی بافق عمدتاً در میدان کنسارهای نوع کایرونا قرار گرفته‌اند. منابع داده‌ها برای کنسارهای نوع کایرونا از (Dare et al., 2015; Dupuis and Beaudoin, 2011; Loberg and Horndahl, 1983; Nystroem and Henriquez, 1994)، می‌باشد.



شکل ۶-۱۶: نمودار متمایز کننده انواع کانسارهای آهن بر اساس غلظت‌های V در برابر Cr (Knipping et al., 2015; Rojas et al., 2018).



فصل ہفتم

مطالعہ میانبارہای سیال

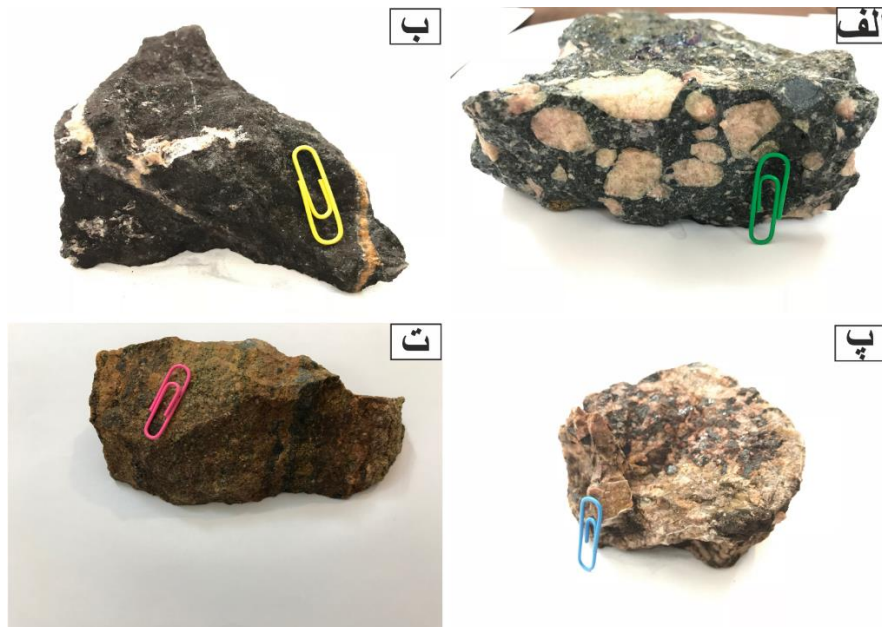
## ۷-۱- مقدمه

در سامانه‌های ماگمایی- گرمابی، ماگماها از نظر تامین حرارت، سیالات ماگمایی و فلزات حائز اهمیت هستند. پتانسیل کانه‌زایی این ماگماها تابع ترکیب سیالات ماگمایی و زمان خروج آن‌ها از ماگما است. که در سیالات و مذاب‌های درگیر ثبت می‌گردد (Audeñtat et al., 2008; John et al., 2010). سیالات و مذاب‌های درگیر در حال حاضر در زمینه‌های مختلف زمین‌شناسی به ویژه در مطالعه فلززایی، به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. قطرات کوچکی از مذاب/مایع که در کانی‌ها به دام افتاده‌اند، حاوی اطلاعاتی در مورد ترکیب و شرایط تکاملی سیستم‌های هیدروترمال و ماگمایی هستند. از اینرو مستقیم‌ترین شواهد موجود در مورد شرایط فیزیکی و شیمیایی محیط در طی تبلور ماگما را در اختیار می‌گذارند (Audetat et al., 1998; Audeñtat et al., 2008; Halter et al., 2005; Sobolev, 1996; SOBOLEV and DANYUSHEVSKY, 1994; Ulrich et al., 1999; Wilkinson, 2001). دانش مطالعات میانبار به عنوان پیشرو اصلی در بررسی کانسارهای گرمابی از ۴۰ سال پیش رشد چشمگیری نموده است. اهمیت مطالعه میانبارهای سیال به عنوان کلید ارزشمندی در درک مسائل گذشته زمین‌شناسی از قبیل دما، فشار، شوری، چگالی، ترکیب سیالات کانسارساز و همچنین ترکیب سیالاتی که تشکیل‌دهنده سنگ‌ها و کانی‌ها بوده و یا طی فرایندهای بعدی از داخل آن عبور کرده‌اند می‌باشد (Roedder, 1984). بر این اساس، برای مطالعه میانبارهای سیال در منطقه فلززایی بافق تعداد ۷ عدد مقطع دوبر صیقل پس از آماده‌سازی در آزمایشگاه مطالعات میانبارهای سیال دانشگاه صنعتی شاهرود مطالعه گردید و نتایج حاصل از آن در ادامه‌ی این فصل مورد بررسی قرار گرفت

## ۷-۲- روش نمونه‌برداری و آماده‌سازی نمونه‌ها

به منظور شناخت ماهیت فیزیکوشیمیایی سیال کانه‌ساز و بررسی روند تغییرات شیمی و دمایی سیال (یا سیالات) کانه‌ساز در طی تشکیل کانسارهای منطقه بافق با توجه به مطالعات صحرائی و مطالعات کانی‌شناسی مقاطع نازک در محدوده، تعداد ۷ نمونه مناسب برای مطالعات سیالات درگیر انتخاب شد

به طوری که ۲ نمونه آپاتیت از مناطق اسفوردی و چغارت، و ۵ نمونه آپاتیت-مگنتیت از مناطق گزستان، چغارت و لکه سیاه انتخاب شد (شکل ۷-۱). ویژگی‌های کانی‌شناسی نمونه‌های انتخابی برای میانبارهای سیال در جدول (۷-۱) آورده شده است.



شکل ۷-۱: الف) تصویری از نمونه دستی کانسنگ آپاتیته که از معدن چغارت برداشت شده است. ب) تصویر نمونه دستی کانسنگ مگنتیتی که از منطقه اسفوردی برداشت شده است. پ) تصویر نمونه دستی کانسنگ آپاتیت-مگنتیت که از منطقه گزستان برداشت شده است. ت) تصویر نمونه دستی کانسنگ مگنتیت-آپاتیت که از منطقه لکه سیاه برداشت شده است.

جدول ۷-۱. ویژگی‌های کانی‌شناسی نمونه‌های انتخاب شده برای مطالعه‌ی میانبارهای سیال

شماره نمونه	انواع کانی‌ها	انواع کانه‌های معدنی	محل نمونه برداری
BE-G-4	کوارتز، کلسیت، آپاتیت	مگنتیت، گوتیت، هماتیت	اسفوردی
BE-G-5	آپاتیت، کوارتز، کلسیت، اپیدوت	مگنتیت	اسفوردی
BG-G-11	آپاتیت، کوارتز، کلسیت	مگنتیت، هماتیت، پیریت	گزستان
BG-G-12	آپاتیت، کوارتز، کلسیت	مگنتیت	گزستان
BL-G-17	آپاتیت، کلسیت	مگنتیت، گوتیت، هماتیت	لکه سیاه
BC-G-19	آپاتیت، کلسیت، ترمولیت	مگنتیت، پیریت	چغارت
BC-G-20	آپاتیت، کوارتز، کلسیت	مگنتیت، پیریت، کالکوپیریت	چغارت

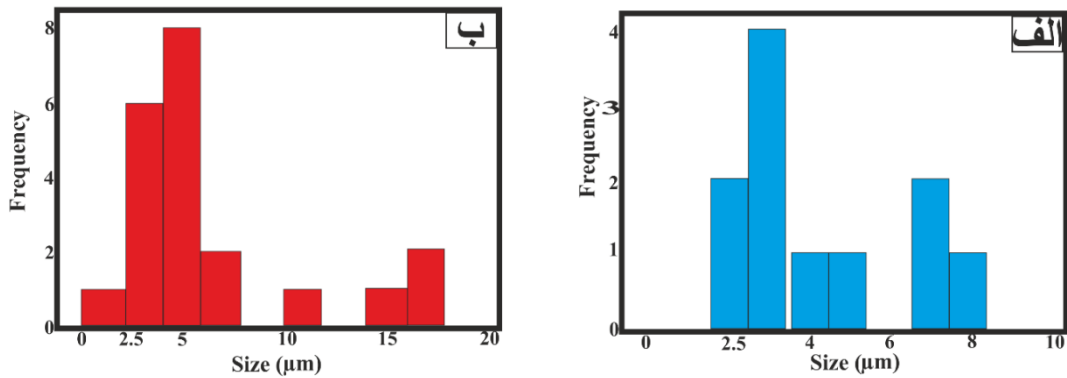
در این مطالعه نمونه‌ها تا ضخامت ۲۰۰ میکرون نازک شده و سپس دوبرصیقل شدند. پس از جدا کردن نمونه‌ها از روی لام و شستشوی آن‌ها، مورد مطالعه قرار گرفتند. در تحقیقات میکروسکوپی برای مطالعه سیالات درگیر انجام شده از مقاطع دوبر پولیش به ضخامت چندین میکرون استفاده شده است. آزمایشگاه تحقیقاتی زمین شناسی اقتصادی و میکروترمومتری سیالات درگیر مجهز به یک دستگاه پیشرفته میانبارهای سیال مدل MDSG600 ساخت کارخانه Linkam انگلستان می باشد. حد اندازه گیری تغییرات دمایی آن از ۱۹۶- تا ۶۰۰+ درجه سانتیگراد و دقت آن ۰/۱ درجه سانتیگراد است.

### ۷-۳- پتروگرافی میانبارهای سیال

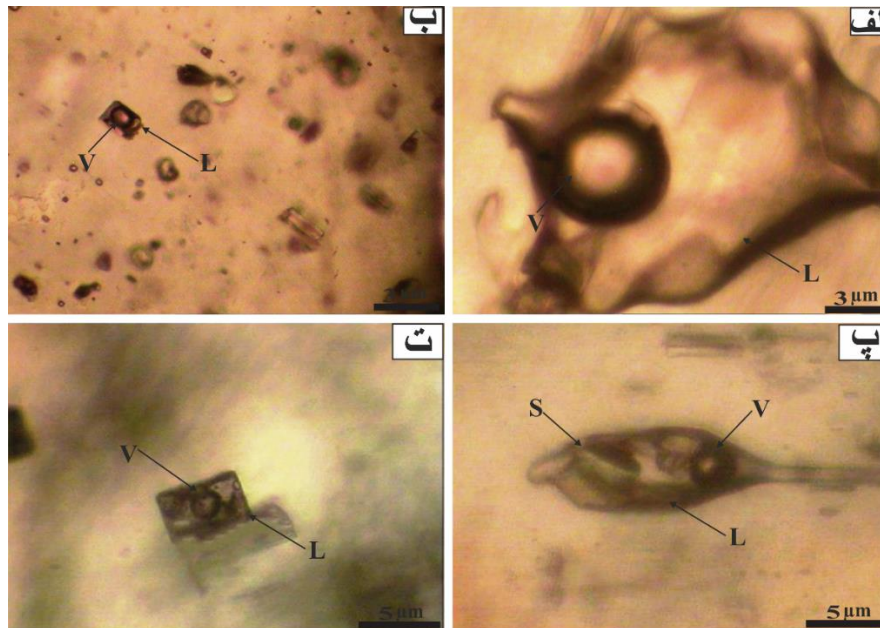
شناسایی روابط پتروگرافی اولین و مهم‌ترین بخش مطالعه میانبارهای سیال می‌باشد. پتروگرافی میانبار سیال اولین گام در مطالعه میانبارهای سیال بوده و اطلاعات مفید و ارزشمندی از شرایط به دام افتادن میانبارهای سیال و تشکیل بلور از این مطالعات حاصل می‌شود. شکل میانبارهای سیال تا حدودی به وسیله ساختمان بلوری کانسنگ میزبان کنترل می‌شود. در مطالعه سنگ‌شناسی، مشخصات نوری از قبیل شکل و اندازه میانبار سیال، رده‌بندی ژنتیکی (اولیه، ثانویه، ثانویه کاذب) محتویات میانبارهای سیال (L+V+S)، نسبت V/L، نوع کانی دختر (با توجه به شکل کریستالی و مورفولوژی ظاهری)، تعیین نوع میانبارها و پدیده‌های تغییر میانبارهای سیال بعد از به دام‌افتادن مانند تراوش و دم‌بریدگی مورد بررسی قرار می‌گیرد. میانبارهای سیال ممکن است، شکل کامل بلور منفی را به خود بگیرند و یا کاملاً شکل نامنظم داشته باشند (Shelton et al., 2004). کانسنگ‌های منطقه فلززایی بافق بر پایه درصد کانی‌های مگنتیت و آپاتیت به انواع غنی از مگنتیت، غنی از آپاتیت و آپاتیت-مگنتیت قابل تقسیم هستند. در مطالعات میانبارهای سیال از کانسنگ‌های هر بخش به‌طور جداگانه برای بررسی میانبارها انتخاب شده است. بر پایه مطالعه مقاطع نازک و نازک صیقلی ۴ نسل آپاتیت در این منطقه شناسایی شده است که شامل آپاتیت‌های نسل اول که به‌صورت بلورهای دانه درشت تظاهر دارند. آپاتیت‌های نسل دوم که به‌صورت یک فاز تاخیری فضای بین آپاتیت‌های درشت

بلور نسل اول را پر کرده‌اند. آپاتیت‌های ریز بلور نسل سوم که همراه با رگه‌هایی از کوارتز، کلسیت و مگنتیت همیافتی دارند و در نهایت نسل چهارم آپاتیت که به صورت هاله‌های کوچک در حاشیه بلورهای درشت که دچار انحلال شده و در حال تبدیل به کریستال‌های نوظهور آپاتیت هستند، مشاهده می‌شود. آپاتیت‌های نسل‌های اول و دوم در مقایسه با آپاتیت‌های نسل‌های سوم و چهارم بزرگ‌تر و از فراوانی قابل ملاحظه‌ای برخوردار هستند. از اینرو در این پژوهش مطالعه میانبارهای سیال بر روی آپاتیت‌های نسل اول و دوم صورت گرفته است. میانبارهای سیال در آپاتیت‌های نسل سوم و چهارم به‌خاطر درصد پایین و ریز بودن کریستال‌های آن‌ها مناسب برای مطالعه ریزدماسنجی نیستند.

بر اساس مطالعات میکروسکوپی، میانبارهای سیال در بلورهای آپاتیت در اندازه‌های بین ۲ تا ۱۷ میکرون دیده شد. میزان بیشینه و کمینه اندازه میانبارهای سیال در آپاتیت‌های نسل اول ۸-۳ میکرون می‌باشد. مقدار متوسط اندازه آپاتیت‌های نسل اول ۴ میکرون و بیش‌ترین فراوانی آن‌ها ۳ میکرون می‌باشد (شکل ۷-۲ الف). بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار اندازه در آپاتیت‌های نسل دوم از ۱ تا ۱۷ میکرون می‌باشد، همچنین مقدار متوسط اندازه در آپاتیت‌های نسل دوم ۵ میکرون و بیش‌ترین فراوانی اندازه آپاتیت‌ها ۵-۴ میکرون می‌باشد (شکل ۷-۲ ب). میانبارهای سیال از لحاظ شکل ظاهری به اشکال گرد، نیمه‌گرد و اغلب نامنظم دیده می‌شود. نبود شکل خاص در میانبارها می‌تواند نشان دهنده‌ی این باشد که فضاهای بین سطوح بلوری که باعث به تله افتادن میانبارها شده‌اند دارای شکل مشخصی نبوده‌اند. از لحاظ تعداد فاز، ۳ نوع میانبارسیال در کانی آپاتیت تشخیص داده شد که شامل میانبارهای دو فاز غنی از مایع (L+V)، دو فاز غنی از گاز (V+L) و میانبارهای سه فاز مایع-گاز-جامد (L+V+S) می‌باشد (شکل ۷-۳). با توجه به اینکه فراوانی میانبارهای L+V بیشتر از سایر میانبارها است لذا اندازه‌گیری‌ها بر روی L+V در این پژوهش انجام شده است.



شکل ۷-۲. هیستوگرام فراوانی اندازه میانبرهای سیال. الف) آپاتیت‌های نسل اول و ب) آپاتیت‌های نسل دوم.



شکل ۷-۳. انواع میانبرهای سیال به همراه اشکال مختلف حضور آنها در نمونه‌های مورد مطالعه: الف) میانبر دوفازی نوع مایع-بخار (L+V)، به صورت شکل دار در کانسار اسفوردی، ب) میانبر دو فازی غنی از بخار (V+L)، به صورت نیمه شکل دار در کانسار لکه‌سیاه، پ) تصویر میکروسکوپی از میانبرسیال سه مرحله‌ای دارای فاز جامد در کانسار گزستان. ت) میانبر دو فازی غنی از بخار (V+L) با اشکال کشیده در کانسار اسفوردی.

#### ۷-۴- مطالعات میکروترمومتری میانبرهای سیال

بررسی میکروترمومتری عبارتست از مطالعه غیرمخرب نمونه مورد نظر برای تعیین دما، شوری، چگالی و ترکیب سیالاتی که کانی میزبان از آنها ساخته شده است، که توسط عملیات سرمایش (freezing) و گرمایش (heating) انجام می‌پذیرد. در حقیقت مبنای کار داماسنجی بر سرد کردن و گرم کردن میانبرهای سیال استوار است. هدف از سرد کردن میانبر سیال، پی بردن به میزان املاح و یا درجه

شوری محلول است. هدف از حرارت دادن میانبارهای سیال، همگن کردن فازهای تشکیل دهنده یک سیال درگیر می‌باشد. دمای همگن شدن (Th) یعنی دمایی که تمامی فازهای جامد و مایع نمونه به صورت محلولی همگن درآید. این دما معرف حداقل درجه حرارت تشکیل کانسار خواهد بود. ویژگی-های مربوط به میکروترمومتری میانبارهای سیال نسل اول و دوم آپاتیت در کانسارهای منطقه بافق در جدول (۲-۷) و (۳-۷) آورده شده‌اند.

جدول ۲-۷. نتایج مطالعات میکروترمومتری میانبارهای سیال آپاتیت‌های نسل اول در منطقه معدنی بافق.

Sample	Mineral	Size(μm)	Type	Phases	Te (C)□	Tm (C)□	Tm (C)□	Th (C)□	Salinity wt%NaCl
BC-G-19	ApatiteI	3	P	L+V	-45	-8	8	360	12.00
BC-G-19	ApatiteI	3	P	L+V	-55	-3	3	410	5.22
BG-G-12	ApatiteI	2	P	L+V	-90	-30	30	215	29.53
BG-G-12	ApatiteI	5	P	L+V	-70	-27	27	220	27.59
BG-G-11	ApatiteI	7	P	L+V	-50	-17	17	187	20.72
BL-G-17	ApatiteI	7	p	L+V	-70	-13	13	170	17.29
BC-G-20	ApatiteI	4	P	L+V	-65	-15	15	155	19.08
BE-G-4	ApatiteI	3	P	L+V	-40	-12	12	150	16.33
BE-G-4	ApatiteI	8	p	L+V	-80	-30	30	150	29.53
BE-G-4	ApatiteI	2	P	L+V	-75	-25	25	145	26.31
BE-G-4	ApatiteI	3	P	L+V	-62	-15	15	130	19.08

جدول ۳-۷. نتایج مطالعات میکروترمومتری میانبارهای سیال آپاتیت‌های نسل دوم در منطقه معدنی بافق.

Sample	Mineral	Size(μm)	Type	Phases	Te (C)□	Tm (C)□	Tm (C)□	Th (C)□	Salinity wt%NaCl
BC-G-19	ApatiteII	4	P	L+V	-50	-15	15	260	19.08
BE-G-5	ApatiteII	10	P	L+V	-37	-4	4	240	6.71
BE-G-5	ApatiteII	4	P	L+V	-50	-5	5	240	8.13
BE-G-5	ApatiteII	17	P	L+V	-46	-6	6	260	9.49
BG-G-11	ApatiteII	5	P	L+V	-40	-3	3	190	5.22
BG-G-11	ApatiteII	3	P	L+V	-43	-5	5	195	8.13
BG-G-11	ApatiteII	3	P	L+V	-47	-13	13	195	17.29
BG-G-11	ApatiteII	1	P	L+V	-50	-11	11	200	15.32
BG-G-11	ApatiteII	15	P	L+V	-47	-12	12	210	16.33
BL-G-17	ApatiteII	5	P	L+V	-50	-4	4	155	6.71
BL-G-17	ApatiteII	2	P	L+V	-50	-10	10	160	14.27

<b>BL-G-17</b>	ApatiteII	2	P	L+V	-60	-9	9	165	13.16
<b>BL-G-17</b>	ApatiteII	7	P	L+V	-35	-4	4	180	6.71
<b>BL-G-17</b>	ApatiteII	4	P	L+V	-53	-2	2	180	3.65
<b>BC-G-20</b>	ApatiteII	6	p	L+V	-60	-6	6	155	9.49
<b>BE-G-4</b>	ApatiteII	2	p	L+V	-55	-7	7	117	10.77
<b>BE-G-4</b>	ApatiteII	5	P	L+V	-41	-8	8	120	12.00
<b>BE-G-4</b>	ApatiteII	16	P	L+V	-43	-4	4	140	6.71
<b>BE-G-4</b>	ApatiteII	3	P	L+V	-20	-6	6	140	9.49
<b>BE-G-4</b>	ApatiteII	5	P	L+V	-62	-11	11	145	15.32
<b>BE-G-4</b>	ApatiteII	4	P	L+V	-40	-2	2	148	3.65

#### ۷-۴-۱- دمای به دام افتادن میانبارهای سیال

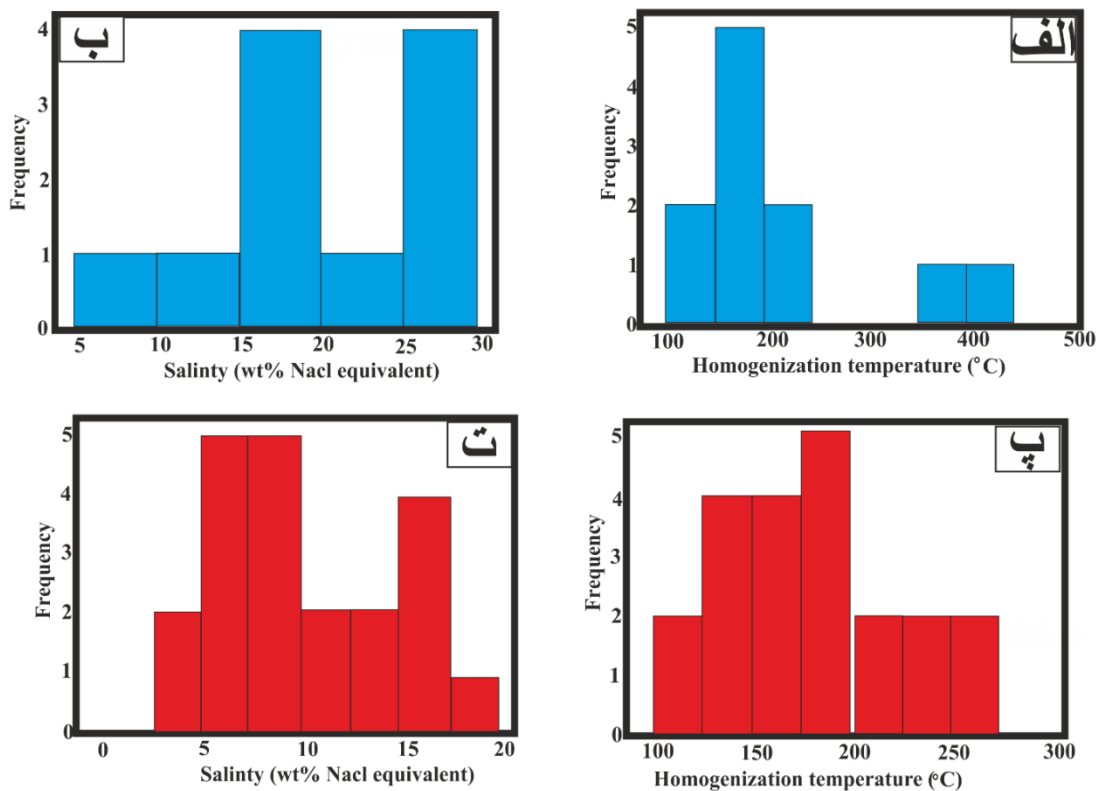
در این مرحله طی گرم کردن سیال، فازهای مختلف تشکیل دهنده سیال آنقدر حرارت داده می‌شوند تا همه فازهای آن به یک فاز اصلی همگن شوند. در تمامی سیالات درگیر مطالعه شده حالت همگن شدن بصورت فاز مایع می‌باشد. در این مطالعات دمای همگن شدن یا Th سیالات درگیر بدست می‌آید که به عنوان حداقل دمای به دام افتادن میانبار سیال یا تشکیل بلور میزبان در نظر گرفته می‌شود. نتایج مطالعات گرمایش سیالات نشان می‌دهد که تغییرات دمای همگن شدن سیالات در آپاتیت‌های نسل اول بین ۱۳۰ تا ۴۱۰ (میانگین ۱۷۴) درجه سانتی‌گراد در تغییر است (شکل شکل ۴-۷ الف). این در حالی است که تغییرات دمای همگن شدن در آپاتیت‌های نسل دوم بین ۲۶۰-۱۴۸ (میانگین ۱۸۰/۷۱) متغیر می‌باشد (شکل ۴-۷ پ).

#### ۷-۴-۲- شوری سیالات

در آزمایش انجماد، میانبار سیال به زیر دمای اتاق سرد می‌شود تا جایی که تغییر فاز از مایع به جامد مشاهده شود. بسته به نوع فازهای تشکیل‌دهنده، ترکیب، چگالی و یا شوری، سیالات مختلف در دماهای مختلفی منجمد می‌شوند. بعد از اینکه انجماد کامل صورت گرفت دوباره نمونه بصورت تدریجی گرم می‌شود تا یخ شروع به ذوب شدن کند. اولین قطره مایعی که ظاهر می‌شود یا به عبارتی اولین دمایی که یخ در آن ذوب می‌شود، دمای یوتکتیک (ET) نامیده می‌شود. این دما ارتباط مستقیم با نوع نمک‌ها و کاتیون‌های موجود در مایع دارد. گرم کردن تا جایی که آخرین بلور یخ ذوب شود



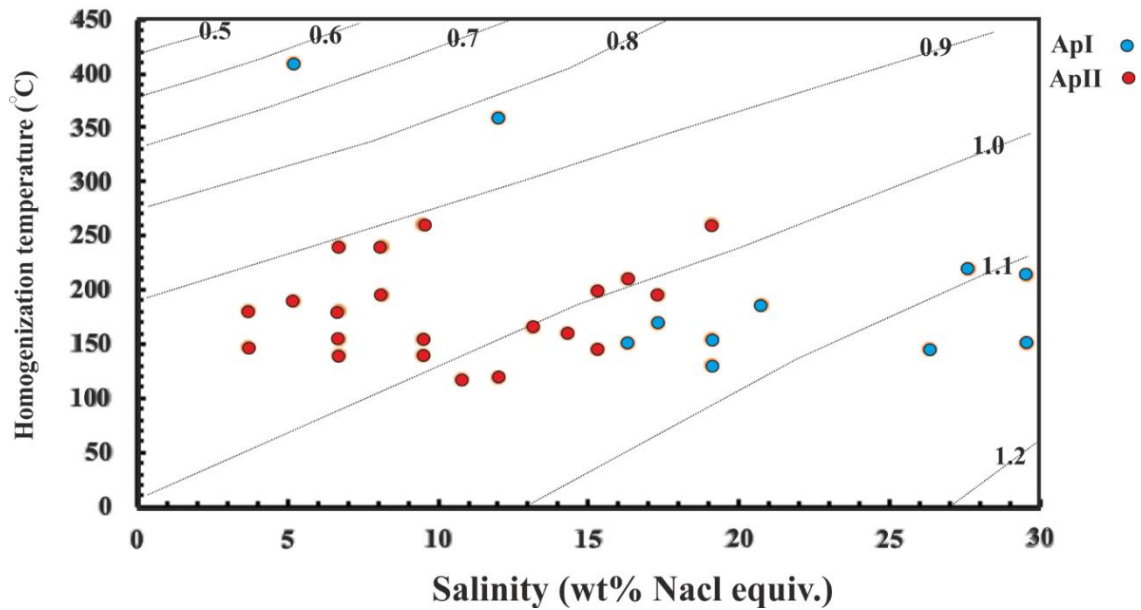
ادامه می‌یابد. دمایی که در آن یخ تماماً ذوب می‌شود دمای نهایی ذوب یخ (Tm) نامیده می‌شود و نشان دهنده میزان شوری سیال است. نتایج مطالعات سرمایش سیالات نشان می‌دهد که کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار شوری در آپاتیت‌های نسل اول به ترتیب ۵/۲۲ و ۲۹/۵۳ (میانگین ۱۵/۶۷) می‌باشد (شکل ۴-۷ ب). تغییرات درجه شوری در آپاتیت‌های نسل دوم بین ۳/۶۵ تا ۱۹/۰۸ (میانگین ۱۰/۳۶) درصد وزنی معادل نمک طعام در تغییر است (شکل ۴-۷ ت).



شکل ۴-۷ الف و ب) هیستوگرام‌های فراوانی دمای همگن شدن و میزان شوری بر حسب درصد وزنی معادل نمک برای آپاتیت‌های نسل اول پ و ت) هیستوگرام‌های فراوانی دمای همگن شدن و میزان شوری بر حسب درصد وزنی معادل نمک برای آپاتیت‌های نسل دوم

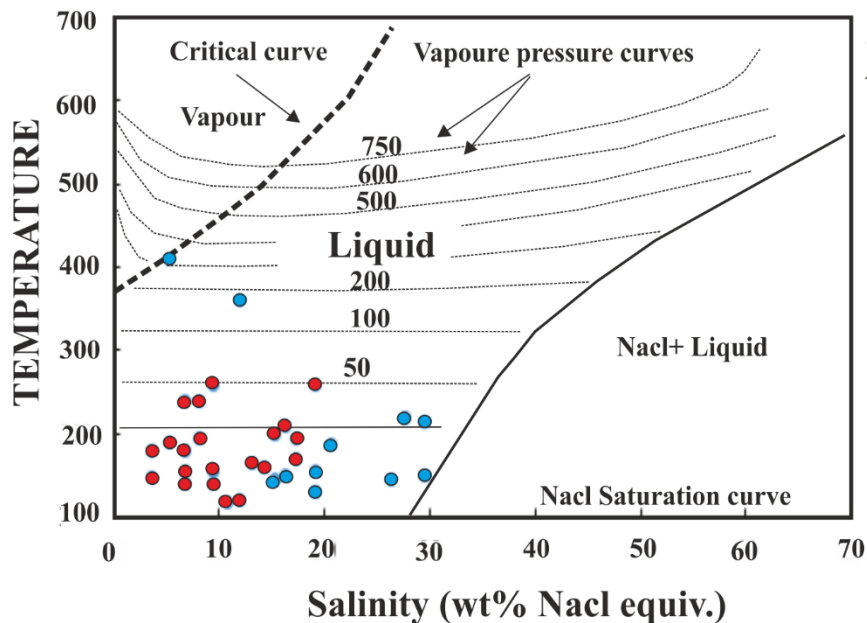
**۳-۴-۷- تغییرات چگالی و تکامل سیال کانه‌دار با استفاده از نمودار خطوط هم‌چگالی**  
 تغییرات چگالی جهت تکامل و تحول سیالات کانه‌دار با استفاده از نمودار (Roedder, 1984) نشان داده شده است. ترسیم داده‌ها در این نمودار و جهت‌گیری ترجیحی آن‌ها می‌تواند فرایندهایی را که با تحول سیال سبب نهشت کانسنگ‌ها شده است را بیان کند. بر طبق این نمودار تحول سیال کانه‌دار به شرح ذیل است:

- ۱- همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود کاهش درجه حرارت یکنواختی سبب افزایش چگالی و کاهش سرعت سیال کانه‌دار و در نهایت سبب ته‌نشینی و تمرکز مواد معدنی می‌گردد.
- ۲- حباب‌زایی و تشکیل سیالات با شوری پایین: در فرایند جوشش، فاز بخار در نتیجه افزایش درجه حرارت یا کاهش فشار ایجاد می‌گردد. این شرایط در سیستم‌هایی که تا حدودی دارای  $CO_2$  می‌باشد رخ می‌دهد و ویژگی خاص میانبارهای میان دمایی (مزوترمال) می‌باشد. در چنین میانبارهایی سیال‌های اولیه با چگالی کم و دارای  $CO_2$  بیشتر به دلیل کاهش درجه حرارت یا کاهش فشار به سمت تشکیل یک سیال چگال‌تر پیش می‌رود. در واقع خروج فاز گازی- تولید حباب سبب افزایش چگالی میانبارهای سیال شده است، این فرایند به نام چگالش معروف است
- ۳- آمیزش سیال: ته‌نشینی ماده معدنی در اثر اختلاط سیالات و کاهش درجه حرارت صورت می‌گیرد. در کانسار آهن- آپاتیت بافق اختلاط یک سیال ماگمایی با سیالات گرمابی باعث کاهش درجه حرارت و شوری و در نتیجه ته‌نشینی فسفات شده است (Wilkinson, 2001)
- ۴- بر اساس مطالعات انجام شده با استفاده از میزان شوری سیال در مقابل دمای همگن‌شدگی و استفاده از خطوط کانتور نمودار (Wilkinson, 2001)، مقدار چگالی محاسبه گردید. مقدار چگالی در آپاتیت‌های نسل اول از  $0/6$  تا  $1/1$  و در آپاتیت‌های نسل دوم از  $0/5$  تا  $0/8$  گرم بر سانتی‌متر مکعب تغییر می‌کند (شکل ۷-۵).



شکل ۵-۷: چگالی میانبارهای مورد مطالعه برحسب  $\text{g.cm}^3$  (Wilkinson, 2001)

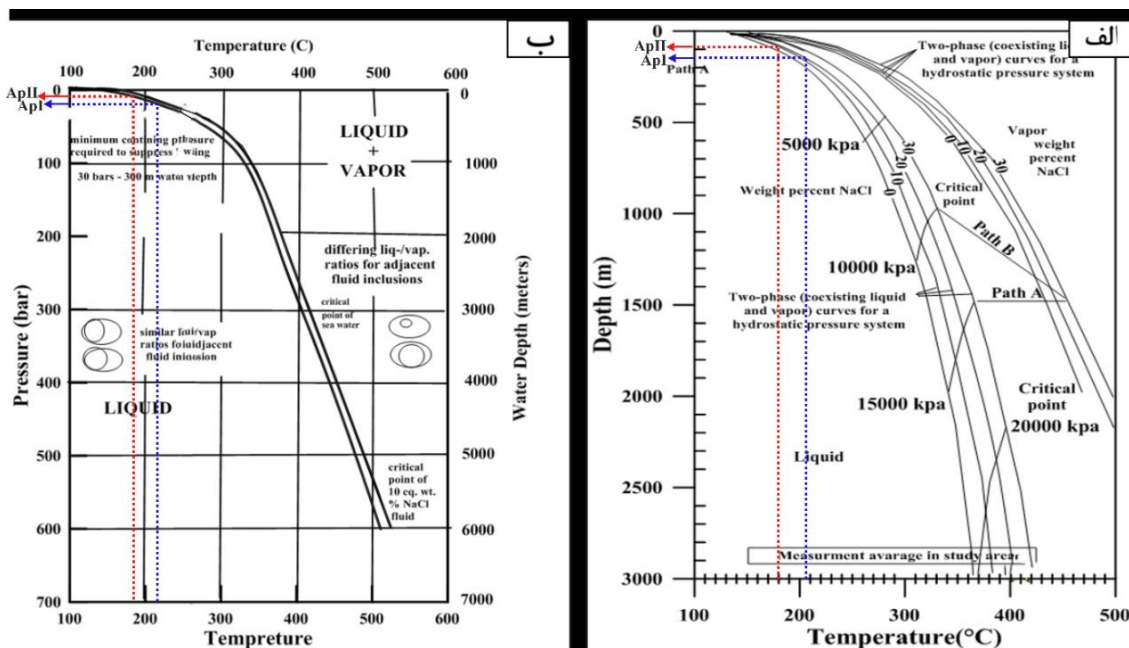
همچنین براساس نمودار ارائه شده که بر پایه‌ی دو پارامتر شوری و دمای همگن شدن است (Driesner and Heinrich, 2007)، آپاتیت‌های نسل اول نسبت به نسل دوم آپاتیت در محدوده نزدیک به غنی از نمک قرار گرفته‌اند که حاکی از شوری بالای سیال این آپاتیت‌ها می‌باشد. از طرفی این نمودار برای تعیین فشار میانبارهای سیال استفاده می‌شود که فشار بخار برای هر دو نسل آپاتیت کمتر از ۵۰ اتمسفر می‌باشد (شکل ۶-۷).



شکل ۶-۷: تعیین فشار بخار بر اساس دمای همگن شدن و میزان شوری (Driesner and Heinrich, 2007)

#### ۷-۴-۴- عمق

براساس نمودار دما- فشار- عمق (Hass, 1971,1976; Sourirajan and Kennedy, 1962)، می توان عمق تقریبی کانی سازی را به دست آورد. در این تحقیق برای کانه زایی آهن- آپاتیت ماگمایی دو نقطه میانگین دما و شوری برای هر کدام از نسل های آپاتیت در نظر گرفته که برای آپاتیت های نسل اول عمق تقریبی ۱۵۰ متر و برای آپاتیت های نسل دوم ۱۰۰ متر برای این بخش از کانه زایی به دست آمده است (شکل ۷-۷ الف). از آنجا که محیط به تله افتادن میانبارهای سیال در این بخش از کانه زایی مرتبط با عمق کم و نزدیک به سطح می باشد، فشار حاکم بر محیط، فشار هیدرواستاتیک نامیده می شود. برای تخمین حداقل فشار و عمق به دام افتادگی سیال از نمودار روابط درجه حرارت- فشار- شوری (Bischoffand & Rosenbauer, 1985) استفاده شده است. در مطالعه میانبارهای سیال بر روی آپاتیت های نسل اول و دوم منطقه فلزایی بافق، درجه حرارت همگن شدن برای آپاتیت های نسل اول بین ۱۳۰ تا ۴۱۰ (میانگین ۱۷۴) درجه سانتی گراد و دامنه شوری ۵/۲۲ و ۲۹/۵۳ (میانگین ۱۵/۶۷ معادل درصد وزنی نمک طعام) و برای آپاتیت های نسل دوم بین ۲۶۰-۱۴۸ (میانگین ۱۸۰/۷۱) سانتی گراد و دامنه شوری بین ۳/۶۵ تا ۱۹/۰۸ (میانگین ۱۰/۳۶ معادل درصد وزنی نمک طعام) برای میانبارهای سیال نشان می دهد. با ترسیم متوسط درجه حرارت همگن شدن برای هر دو نسل آپاتیت بر روی این نمودار حداقل عمق به دام افتادگی میانبارهای سیال که از رخداد جوشش جلوگیری می کند ۳۰ بار است که معادل با عمق ۳۰۰ متری می باشد (شکل ۷-۷ ب).

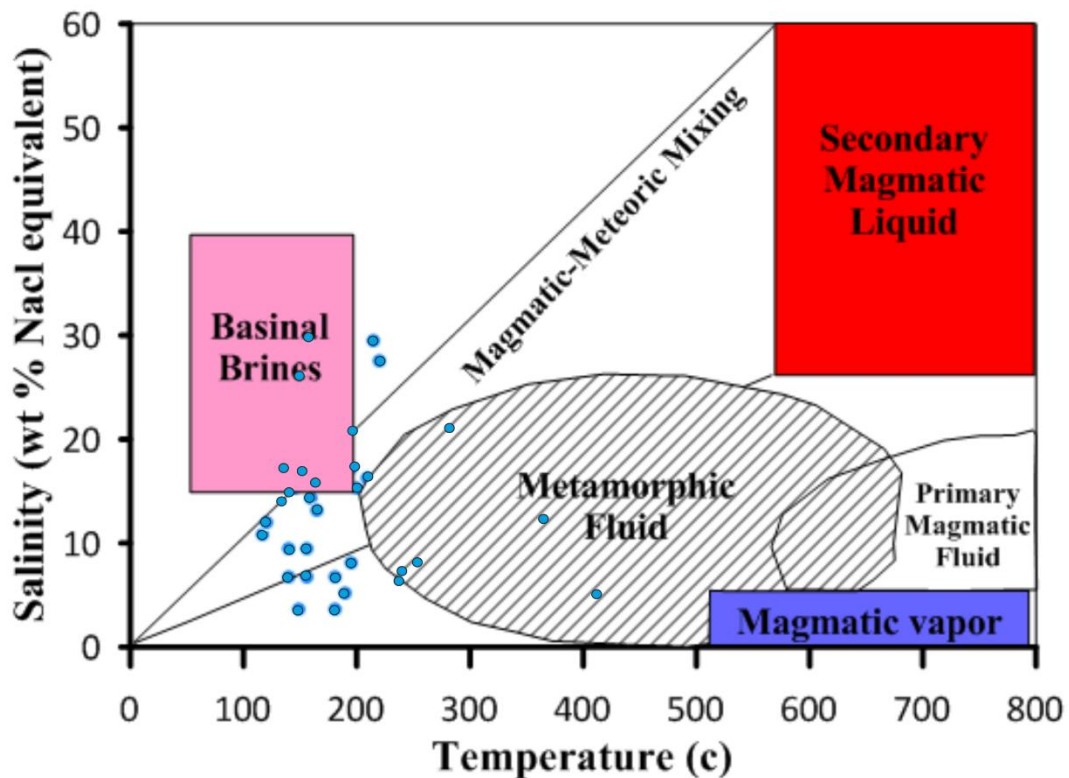


شکل ۷-۷: الف) نمودار دما-فشار-عمق جهت تعیین عمق که در آن با استفاده از دمای همگن‌شدگی و شوری عمق ۱۰۰ تا ۱۵۰ متر برای کانه‌زایی بخش آهن-آپاتیت به دست آمده است. ب) نمودار تخمین حداقل فشار و عمق به دام افتادگی سیال از نمودار روابط درجه حرارت-فشار-شوری (Bischoffand & Rosenbauer, 1985)، استفاده شده است.

#### ۷-۴-۵- تعیین منشا سیالات مولد کانه ساز در کانه‌زایی آهن-آپاتیت

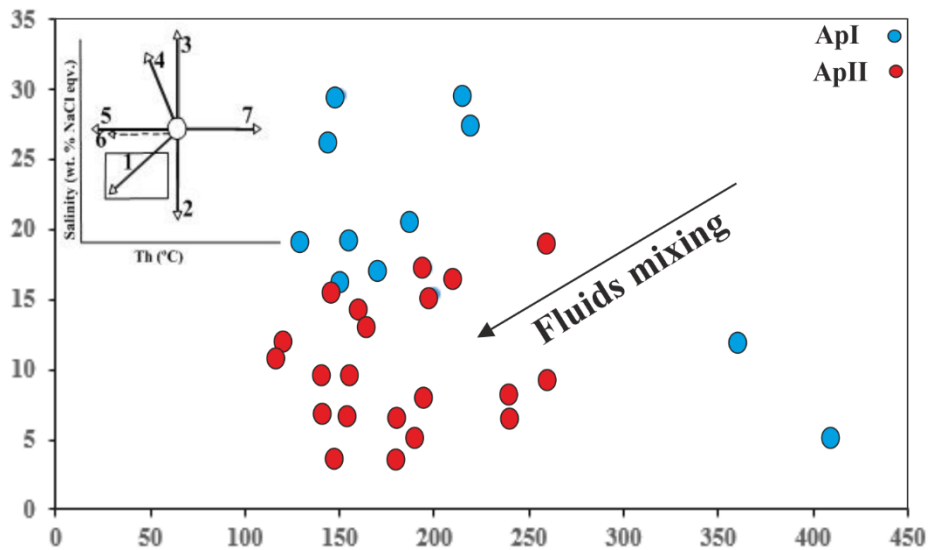
با استفاده از نمودار دوتایی میزان شوری به درجه حرارت یکنواختی می‌توان بدون استفاده از ایزوتوپ-های پایدار تا حدودی منشا سیالات کانسار ساز را پیش بینی نمود (Kesler, 2005)، همان‌طور که در (شکل ۷-۷) دیده می‌شود اکثریت میانبارهای سیال کانسار آهن-آپاتیت بافق در محدوده سیالات کانسار ساز ماگمایی-گرماپی قرار می‌گیرند این نشان می‌دهد که هر دوی این آب‌ها مسئول کانه‌زایی فسفات در کانسار آهن-آپاتیت بافق بوده است. با توجه به میزان شوری میانبارهای سیال احتمال آمیزش این سیالات با یکدیگر و اهمیت هر دو فرایند در کانه‌زایی مطرح می‌گردد. در مواردی که آمیزش سیالات ماگمایی با سیالات گرمایی صورت گیرد درجه شوری میانبارهای سیال تا کمتر از ۲۰ درصد وزنی معادل نمک طعام می‌رسد. بنابراین این امکان وجود دارد که در آمیزش آب‌های ماگمایی با سیالات گرمایی درجه حرارت و شوری سیال ماگمایی کاهش یابد. با توجه به حضور میانبارها در محدوده سیالات کانسار ساز ماگمایی-گرماپی نظریه تشکیل کانه‌زایی فسفات توسط سیالات ماگمایی-

گرمایی مورد تایید است. با توجه به (شکل ۶-۹) می توان گفت که منشا سیالات ایجاد کننده آپاتیت-های منطقه مورد مطالعه ماگمایی است.



شکل ۷-۸: تشخیص نوع سیالات کانی ساز با استفاده از میزان شوری در مقابل درجه حرارت یکنواختی ( Kesler, 2005)

همچنین مطالعه دیگر نیز نشان می دهد که مشابه با دیگر ذخایر تیپ کایرونا، دو نوع سیال مختلف در تشکیل کانسارهای آهن- آپاتیت بافق نقش داشته اند: (۱) سیال با دمای بالا بین ۲۶۰ تا ۴۱۰ درجه سانتی گراد و شوری بالا بین ۲۰ تا ۲۹ درصد NaCl که ماهیت ماگمایی دارد و (۲) سیال عمدتاً با دمای متوسط (بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی گراد و شوری نسبتاً پایین ۱۰ تا ۲۰ درصد NaCl)، این مسئله حکایت از مخلوط شدگی سیالات ماگمایی با سیالات با دما و شوری کمتر دارد. فرایند اختلاط بین محلول ماگمایی کانه دار گرم و شور و محلول جوی سردتر و کم شور می تواند باعث کاهش دما و ته نشینی فلزات شود (ملکزاده سفارودی و کریم پور، ۱۳۹۳؛ لطیفی ساعی و همکاران ۱۳۹۳).



شکل ۷-۹: موقعیت قرارگیری نمونه‌های مربوط به منطقه مورد مطالعه در نمودار شوری در مقابل دمای همگن شدن (Wilkinson, 2001) و روند فیزیکی مربوط به تشکیل کانسار بر اساس مقدار  $Fe_2O_3$  و  $P_2O_5$  نمونه‌های میانبار سیال در دو گروه غنی از آپاتیت و غنی از مگنتیت قرار می‌گیرد. در جدول (۷-۴) تغییرات درجه حرارت و شوری برای هر یک از کانسنگ‌های مذکور آورده شده است. بر پایه محاسبات صورت گرفته مقدار متوسط درجه حرارت در کانسنگ‌های مگنتیتی ۱۶۴/۵ و در کانسنگ‌های آپاتیتی ۲۶۹/۱۴ می‌باشد، همچنین میانگین درجه شوری در کانسنگ‌های غنی از مگنتیت ۱۳/۳۳ و در کانسنگ‌های غنی از آپاتیت ۱۶/۲۵ می‌باشد. اعداد داخل پرانتز مقدار میانگین درجه حرارت و شوری در هر یک از کانسنگ‌های منطقه مورد مطالعه است.

جدول ۷-۴: نتایج میکروترمومتری در کانسنگ‌های مگنتیت و آپاتیت منطقه معدنی بافق

Row	Sample	Deposit	$Fe_2O_3$	$P_2O_5$	Type of ore	Th (C)	Salinity wt%NaCl
1	BE-G-4	Esfordi	84.96	1.56	Magnetite	117-150(138.5)	3.65-29.53(14.92)
2	BE-G-5	Esfordi	5.03	35.51	Apatite	240-260(246.6)	6.71-9.49(8.11)
3	BL-G-17	Lakehsiyah	92.97	0.47	Magnetite	155-180(168.33)	3.65-17.29(10.3)
4	BG-G-11	Gazestan	54.04	11.91	Magnetite	187-210(196.16)	5.22-20.72(13.83)
5	BG-G-12	Gazestan	23.88	19.36	Apatite	215-220(217.5)	27.59-29.53(28.56)
6	BC-G-19	Choghart	14.25	8.53	Apatite	260-410(343.33)	5.22-19.08(12.09)
7	BC-G-20	choghart	90.65	1.51	Magnetite	155(155)	9.49-19.8(14.28)





فصل ہشتم

نتیجہ گیری، ٹیپ و الگوی تشکیل کانسار

و پیدائش

## ۸-۱- مقدمه

هدف از مطالعات انجام شده بر روی ویژگی‌های مختلف یک کانه‌زایی شامل زمین‌شناسی، سنگ-نگاری، کانی‌شناسی، ساخت و بافت، زمین‌شیمی و مطالعه میانبارهای سیال، شناسایی پدیده‌هایی است که منجر به تشکیل و تمرکز عناصر معدنی گردیده است. برای رسیدن به چنین هدفی لازم است تمام پدیده‌های مرتبط با تشکیل و تمرکز ماده معدنی مورد بررسی قرار گیرند. در این بخش از پژوهش سعی شده تا با استفاده از شواهد زمین‌شناسی صحرایی، سنگ‌شناسی، کانه‌نگاری، زمین‌شیمی، و میانبارهای سیال کانه‌زایی‌های آهن-آپاتیت منطقه بافق به جمع‌بندی مهم‌ترین خصوصیات کانه‌زایی‌ها در این منطقه پرداخته شده است. ابتدا ویژگی‌های کانه‌زایی‌های آهن-آپاتیت منطقه فلززایی بافق توصیف گردیده است و تقسیم‌بندی کلی انواع کانسارهای آهن-آپاتیت آورده شده است. پس از آن ویژگی‌های کانه‌زایی آهن-آپاتیت منطقه مورد مطالعه با کانسارهای مشابه در ایران و جهان مقایسه شده است. در نهایت، به نحوه تشکیل و الگوی ژنتیکی رخداد‌های کانه‌زایی منطقه بافق پرداخته شده است، و در پایان نتیجه‌گیری و پیشنهاد‌های لازم ارائه گردیده است.

برپایه مشاهدات زمین‌شناسی صحرایی و مطالعات سنگ‌نگاری، کانه‌نگاری، زمین‌شیمی و میانبارهای سیال ویژگی‌های زمین‌شناسی و معدنی کانسارهای مگنتیت-آپاتیت منطقه مورد مطالعه به شرح زیر می‌باشد

## ۸-۲- زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی

بر اساس شواهد صحرایی سری ریزو به عنوان سنگ میزبان کانسارهای منطقه مورد مطالعه شناخته می‌شود. سری ریزو تناوبی از سنگ‌های دولومیتی، ماسه سنگ، ماسه سنگ توفی، شیل، گدازه، و توف‌های بازالتی، گدازه و توف‌های ریولیتی، ریوداسیتی تا آندزیتی، متاسوماتیت‌ها، نوارهایی از چرت-های آهن‌دار (ژاسپیلیت) و اکسیدهای آهن-منگنز و نیز کانه‌زایی‌های آپاتیت و مگنتیت را شامل می‌گردد. گسترش واحدهای سنگی دولومیتی و ماسه‌سنگی در بخش‌های قاعده‌ای سری ریزو بیشتر از

سایر بخش‌های آن می‌باشد. گدازه‌ها و توف‌های بازالتی از بخش‌های فراگیر در سری ریزو است و عمدتاً در بخش‌های غرب و شمال غرب منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌گردد. مشاهدات صحرایی نشان می‌دهد که سنگ‌های بازالتی به دور از مناطق کانه‌زایی و توده‌های نفوذی درجات پایینی از دگرگونی و متاسوماتیسم را متحمل شده‌اند به طوری که ترکیب کانی‌شناسی و بافت اولیه خود را حفظ کردند. در سری ریزو گدازه و توف با ترکیب ریولیت، آندزیت و آندزیت بازالتی مشاهده می‌گردد. این سنگ‌ها به صورت بین لایه‌ای با سایر واحدهای سنگی سری ریزو و نیز به صورت لایه‌های منفرد و یا دم‌های آتش‌فشانی تشکیل شده‌اند. وجود این سنگ‌های آتش‌فشانی بیانگر فعالیت‌های آتش‌فشانی زیر دریایی همزمان با رسوب گذاری در محیط‌های ریفتی پرکامبرین بالای است. متاسوماتیت‌ها بخش عمده و مهمی از سری ریزو را در منطقه فلززایی بافق به خود اختصاص می‌دهند و میزبان کانه‌زایی‌های آهن و آپاتیت می‌باشند. اظهار نظر در مورد ترکیب اولیه سنگ‌های منشا آن‌ها خیلی آسان نیست چون که سنگ‌های والد آن‌ها درجات بالایی از متاسوماتیسم را پشت سر گذاشته‌اند. با وجود این، مشاهدات صحرایی و سنگ‌نگاری نشان می‌دهد که سنگ‌های والد آن‌ها سنگ‌های آتش‌فشانی-رسوبی سری ریزو (به ویژه توف‌های ریولیتی تا ریوداسیتی) می‌باشد، که در نتیجه نفوذ توده‌های آذرین فلسیک تا مافیک فرایندهای گرمایی ناشی از این توده‌ها و نیز رخدادهای تکتونیکی دچار متاسوماتیسم شدید شده‌اند. در سری ریزو علاوه بر واحدهای سنگی مذکور، لایه و نوارهایی از اکسیدهای منگنز، آهن و سیلیس‌های آهن‌دار (ژاسپیلیت) وجود دارد. این نوارها عموماً در واحدهای مرمر دولومیتی و گدازه و توف‌های بازالتی مشاهده می‌گردد. در قسمت‌های سطحی نوارهای آهن-منگنز و سیلیس‌های آهن‌دار که به وسیله گدازه‌های بازالتی میزبانی می‌شوند.

در منطقه معدنی بافق سنگ‌های آذرین درونی به صورت توده و دایک مشاهده می‌گردد. ترکیب سنگ‌شناسی و شیمیایی آن‌ها از فلسیک تا مافیک می‌باشد. این سنگ‌ها در سری آتش‌فشانی-رسوبی ریزو تزریق شده و در فرایند دگرگونی، متاسوماتیسم و کانه‌زایی آهن، فسفر و عناصر کمیاب نقش داشته‌اند. توده‌های نفوذی (به ویژه سینیت) در تماس خود با سنگ‌های کربناتی، آواری و آتش‌فشانی

سبب ایجاد مناطق اسکارنی در مقیاس محلی شده‌اند. بر پایه مشاهدات صحرایی و مطالعات سنگ-نگاری جنس سنگ‌های نفوذی منطقه معدنی بافق سینیت، گرانیت، دیوریت و مونزونیت است. سینیت از توده‌های آذرین نفوذی مهم در منطقه فلززایی بافق می‌باشد و از گسترش قابل توجهی در منطقه معدنی اسفوردی برخوردار است. دیوریت یکی دیگر از سنگ‌های نفوذی در منطقه فلززایی بافق است، که در داخل متاسوماتیت‌ها (به‌ویژه شیل‌های توفی دگرسان شده) تزریق شده است. پیمایش‌های صحرایی در منطقه لکه‌سیاه، سنگ آذرین منحصر بفردی را نشان داد. بر اساس مطالعات سنگ‌نگاری، آن‌ها را مونزونیت نام‌گذاری شده است. این سنگ‌ها در تماس خود با توالی کربناتی-آواری بخش پایینی سری ریزو سبب متاسوماتیسم سنگ‌های دولومیتی، ماسه سنگ، و ماسه سنگ توفی و تشکیل سنگ‌های اسکارنی و آهن‌های با منشاء اسکارنی شده‌اند. اسکارن معمولاً توسط متاسوماتیسم شیمیایی سنگها در طی فرایند دگرگونی و در محل تماس سنگ‌های نفوذی ماگمایی مانند گرانیت‌ها با سنگ‌های غنی از کربنات مانند کلسیت و دولومیت تشکیل می‌شود. بر اساس شواهد صحرایی این سنگ‌ها در منطقه اسفوردی به صورت محلی و در تماس با سینیت‌ها و در منطقه لکه‌سیاه در مجاورت مونزونیت و بخش‌های غنی از مگنتیت دیده می‌شود. بررسی‌های صحرایی و مطالعات پتروگرافی صورت گرفته در معدن چغارت نیز بیانگر وجود این سنگ‌های دگرگونی است. گرانیت به صورت دایک و توده‌های کوچک آپلیتی در سنگ‌های سری ریزو (به ویژه درون سنگ‌های مونزونیت) در منطقه لکه‌سیاه مشاهده می‌گردد. و محصول نهایی تفریق ماگماهای مافیکی می‌باشند و با سنگ‌های گابرویی، دیوریتی و سینیتی منطقه فلززایی بافق هم‌ماگما می‌باشند.

### ۸-۳- کانه‌نگاری، ساخت، بافت و توالی پاراژنزی کانی‌ها

از نظر شکل ظاهری (ساختار) کانه‌زایی‌ها در منطقه فلززایی بافق به شکل‌های توده‌ای، لامینه‌ای، رگه-رگچه‌ای، داربستی، دانه‌پراکنده، پرکننده فضاهای خالی و برشی مشاهده می‌شوند. میزان و گسترش این ساختارها میان مناطق مختلف معدنی متفاوت است ولی در مجموع ساختارهای توده‌ای نسبت به

شکل‌های دیگر کانه‌زایی غالب هستند. ساخت توده‌ای یکی از شاخص‌ترین شکل‌های کانه‌زایی آهن - آپاتیت در منطقه معدنی بافق است. ساخت توده‌ای در منطقه فلززائی بافق به شکل دایک‌های غنی از آپاتیت و مگنتیت نیز مشاهده می‌شود. ساختار توده‌ای کانه‌زایی‌های آهن - آپاتیت در منطقه فلززایی بافق از تبلور مستقیم ماگما ناشی می‌شود ساخت لامینه‌ای کانه‌زایی منگنز و آهن - منگنز بیشتر در بخش‌های غربی و جنوب‌غربی منطقه مورد مطالعه وجود دارد. در توالی سری ریزو، این شکل از کانه‌زائی به صورت بین لایه‌ای با دولومیت، ماسه‌سنگ، شیل توفی، بازالت و متاسوماتیت‌ها مشاهده می‌شود، که حکایت از منشا آتشفشانی - رسوبی آن‌ها دارد. آنچه که به عنوان ساخت رگه - رگچه‌ای در منطقه فلززائی بافق وجود دارد شامل انواع رگه - رگچه‌های مگنتیت، آپاتیت، و هماتیت است که بعضاً با کلسیت و کوارتز همراهی می‌شوند. یکی دیگر از شکل‌های کانه‌زایی در منطقه فلززائی بافق، رگه - رگچه‌های نامنظم می‌باشد. در اثر ورود محلول گرمابی فلزدار به داخل شکستگی‌های سنگ‌های میزبان، کانی‌های مگنتیت، آپاتیت، پیرولوسیت، کوارتز و کلسیت در فضاهای خالی شکستگی‌های نامنظم رشد کرده و ساخت داربستی را تشکیل داده‌اند. شکل دیگری از کانه‌زایی که در منطقه معدنی بافق بر اساس پیمایش‌های صحرایی مشاهده گردید، کانه‌زایی به شکل پرشدگی حفرات و فضاهای بین قطعات سنگ می‌باشد. سیمای کانه‌زایی برشی را قطعات آتشفشانی زاویه‌دار تشکیل می‌دهند که فضای بین قطعات برشی توسط اکسیدهای آهن و آپاتیت پر شده است. اشکال رگه و رگچه‌ای، داربستی، پرشدگی فضاهای خالی و برشی از فعالیت سیالات با منشا ماگمایی و گرمابی (هیدروترمال) ناشی می‌شود.

سری ریزو در منطقه فلززائی بافق، لایه و نوارهایی از اکسیدهای منگنز، آهن و سیلیس‌های آهن‌دار (ژاسپیلیت) را دارا می‌باشد. بر پایه مشاهدات صحرایی پژوهش حاضر، این تیپ کانه‌زائی در بخش‌های غربی و جنوب‌غربی معدن آپاتیت اسفوردی وجود دارد. این نوارها عموماً در واحدهای متادولومیت و گدازه و توف‌های بازالتی مشاهده می‌گردد. پیرولوسیت، مگنتیت‌های هماتیتی شده، اسپیکیولاریت، هماتیت، گوتیت، پسیلوملان، و ژاسپیلیت ترکیب کانی‌شناسی غالب آن‌ها را تشکیل می‌دهد. ضخامت

لایه‌های منگنز و آهن از حد چند سانتی‌متر تا بیش از ۱ متر متغیر است. در کانسنگ‌های آهن-منگنز نواری که به‌صورت متناوب با سیلیس‌های آهن‌دار مشاهده می‌گردند، ابتدا کانی‌های ژاسپر، مگنتیت، اکسیدهای منگنز نظیر پیرولوسیت و بیوتیت‌های آهن‌دار به‌صورت اولیه و همزمان تشکیل شده است. در نتیجه عملکرد سیالات گرمایی تاخیری کانی‌هایی نظیر الیژیست، پسیلوملان، کوارتز و کلسیت تشکیل شده‌اند که به‌صورت رگه و رگچه‌هایی لایه بندی کانی‌های مرحله‌ی اول را قطع نموده‌اند. تحت تاثیر فرایند هوازدگی و سوپرژن کانی‌هایی نظیر هماتیت، گوتیت، لیمونیت و اپسومیت تشکیل شده است.

کانه‌زائی‌های آهن-آپاتیت با منشاء ماگمایی-گرمایی مهم‌ترین رخداد معدنی در منطقه فلززائی بافق می‌باشد. کانها شامل اکسیدهای آهن (مگنتیت، هماتیت، اسپیکولاریت، گوتیت، و لیمونیت)، آپاتیت، پیریت و کالکوپیریت می‌باشد. هورنبلند، ترمولیت، اکتینولیت، بیوتیت، کلریت، اپیدوت، گارنت، کوارتز، و کلسیت کانها را در کانه‌زائی‌های منطقه بافق همراهی می‌نمایند. مگنتیت و آپاتیت از کانی‌های اصلی سازنده‌ی این کانسارها به حساب می‌آیند، و تغییرات قابل توجهی در نسبت این دو در کانسارهای منطقه بافق مشاهده می‌شود. بر پایه درصدهای مگنتیت و آپاتیت (عیارهای آهن و فسفر) هر کانسار به نوبه خود به بخش‌های غنی از مگنتیت، مگنتیت-آپاتیت و غنی از آپاتیت بلوک‌بندی می‌شود. بر پایه مطالعات میکروسکوپی سه نسل مگنتیت در منطقه بافق شناسایی گردید. نسل اول شامل بلورهای دانه ریز تا متوسط مگنتیت است که به صورت ادخال در داخل آپاتیت‌های درشت بلور قرار دارند، که بیانگر تقدم تشکیل این نسل از مگنتیت‌ها نسبت به آپاتیت‌های نسل اول است. نسل دوم مگنتیت‌های درشت بلوری هستند که فضای بین بلورهای آپاتیت نسل اول را پر می‌کند و به صورت غالب در منطقه دیده می‌شود. نسل سوم مگنتیت آنهایی هستند که به صورت رگه-رگچه‌های مگنتیت، کوارتز، کلسیت و آپاتیت، متاسوماتیت‌ها و کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت نسل‌های پیشین را قطع می‌نمایند. مگنتیت‌های این نسل خودشکل و درشت بلور هستند. آپاتیت یکی از کانی‌های غالب در کانسارهای آهن-آپاتیت منطقه بافق است که بیشتر همراه با فاز اکسیدهای آهن عمدتاً مگنتیت و

مگنتیت‌های هماتیته شده و کانی‌های باطله مشاهده می‌شود. مطالعه توالی پاراژنزی کانی‌ها وجود چهار نسل زایش آپاتیت را در منطقه فلززائی بافق نشان می‌دهد. آپاتیت‌های نسل اول به صورت بلورهای دانه درشت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار تظاهر دارند و در مواردی دارای ادخال‌هایی از مگنتیت‌های نسل اول هستند. اندازه بلورهای این نسل از آپاتیت‌ها از یک میلی‌متر تا بیش از دو سانتی‌متر متغیر است. آپاتیت‌های نسل دوم به همراه مگنتیت و بندرت کانی‌های سیلیکاتی به صورت یک فاز تاخیری فضای بین درشت بلورهای آپاتیت نسل اول را پر کرده‌اند. این نسل از آپاتیت‌ها دانه ریز تا متوسط هستند. نسل سوم آپاتیت که به صورت ریز بلور در منطقه گزستان مشاهده می‌شود و همراه با رگه‌هایی از کوارتز، کلسیت و مگنتیت همیافتی دارند همچنین در بعضی از مناطق نسل سوم آپاتیت باعث قطع شدگی کلسیت و مگنتیت‌های هماتیته شده می‌شوند. در نهایت نسل چهارم آپاتیت که بیشتر در منطقه اسفوردی مشاهده می‌شود آپاتیت‌هایی هستند که به صورت هاله‌های کوچک در حاشیه بلورهای درشت که دچار انحلال شده و در حال تبدیل به کریستال‌های نوظهور آپاتیت هستند، مشاهده می‌شود. توالی پاراژنتیکی تشکیل کانی‌های مگنتیت و آپاتیت در کانسارهای منطقه فلززایی بافق به صورت زیر خلاصه می‌شود:

مرحله اول: تشکیل مگنتیت‌های نسل یک می‌باشد که به صورت ادخال در درشت بلورهایی از آپاتیت نسل یک قابل مشاهده است. این گروه از آپاتیت‌های نسل یک دارای فراوانی نسبتاً بالایی در منطقه می‌باشند. کانی‌های نسل اول منشا ماگمایی دارند.

مرحله دوم: شکل‌گیری همزمان کریستال‌های مگنتیت- آپاتیت نسل دوم می‌باشد که به صورت مایعاتی از آهن- آپاتیت فضای بین مگنتیت- آپاتیت‌های نسل اول را پر می‌کنند. مگنتیت- آپاتیت- های نسل دوم نسبت به سایر مراحل کانی‌سازی گسترده‌تر هستند. به عبارتی فاز غالب کانه‌زایی آهن- آپاتیت در منطقه می‌باشند. پیریت و کالکوپیریت نیز همراه با مگنتیت و آپاتیت نسل اول مشاهده می‌شوند. این کانی‌ها هم به صورت ادخال در مگنتیت و هم به صورت تاخیری در فضای بی بلورهای مگنتیت- آپاتیت نسل دوم مشاهده می‌شوند. کانی‌های نسل دوم منشا ماگمایی دارند.

مرحله سوم: نسل سوم بیشتر رگه‌های آپاتیتی و مگنتیتی هستند که نسل‌های قبل را قطع می‌کنند و نسبت به فازهای قبلی گسترش ندارند. به نظر می‌رسد این نسل از کانه‌زایی آپاتیت و مگنتیت حاصل انحلال و کانی‌سازی مجدد نسل‌های یک و دو آپاتیت بوده که به صورت رگه به این سیستم وارد و فضاهای خالی و درز و شکستگی‌ها را تحت تاثیر قرار داده است. کانی‌های نسل سوم منشا گرمایی دارند.

مرحله چهارم: نسل چهارم آپاتیت‌های که به صورت هاله‌های کوچک در حاشیه بلورهای درشت که دچار انحلال شده و در حال تبدیل به کریستال‌های نوظهور آپاتیت هستند، مشاهده می‌شود. این نسل از آپاتیت‌ها در منطقه اسفوردی قابل مشاهده هستند. کانی‌های نسل چهارم منشا گرمایی دارند.

مرحله فعالیت‌های سوپرژن و هوازدگی: در ادامه تحت تاثیر فرایندهای سوپرژن و هوازدگی کانی‌های هماتیت، گوتیت، لیمونیت و... شکل گرفته‌اند.

#### ۸-۴- زمین‌شیمی سنگ‌های آذرین

بر اساس طبقه‌بندی میدل موست که بر پایه نسبت  $(Na_2O + K_2O)$  در مقابل  $SiO_2$  طراحی شده است، سنگ‌های آتشفشانی منطقه معدنی بافق در محدوده بازالت، تراکی آندزیت بازالتی، داسیت و ریولیت قرار می‌گیرند. در طبقه‌بندی وینچستر و فلویید که بر اساس نسبت  $Zr/TiO_2$  در برابر  $Nb/Y$  و با مقیاس لگاریتمی طراحی شده است، سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد مطالعه در محدوده سنگ‌های ریولیت، ریوداسیت تا داسیت، آلکالی بازالت و ساب‌آلکالی بازالت قرار گرفتند. همچنین بر اساس نسبت  $SiO_2$  در مقابل  $Zr/TiO_2$  سنگ‌های آتشفشانی منطقه تنوع ترکیبی از ریولیت، ریوداست-داسیت، آندزیت و ساب‌آلکالی بازالت را نشان می‌دهند. در نمودار به‌هنجار شده ترکیب سنگ‌های آتشفشانی نسبت به ترکیب گوشته اولیه، تهی‌شدگی عنصر فسفر احتمالاً ناشی از شرکت این عنصر در مراحل نخستین تبلور ماگما بوده که به تدریج طی افزایش تبلور ماگما از میزان  $P_2O_5$  کاسته می‌شود عناصر LILE نظیر Ba، K، Rb نسبت به عناصر HFSE و LREE نظیر Nb، Ti، Sm، Eu، La



غنی‌شدگی از خود نشان می‌دهند. در نمودار الگوی به‌هنجار شده نمونه‌های سنگ‌های آتشفشانی منطقه نسبت به کندریت عناصر کمیاب خاکی سبک نسبت به عناصر کمیاب خاکی سنگین فقیرشدگی نشان می‌دهند. علاوه بر این در الگوهای رسم شده، بی‌هنجاری منفی در Eu دیده می‌شود که طبق پژوهش هو و همکاران (Hu et al., 2015)، در صورتی که به‌هنجاری منفی Eu همراه با بی-هنجاری منفی عناصر Ba و Sr باشد، ماگمای سازنده سنگ بر اثر تفریق پلاژیوکلاز و آلکالی‌فلدسپار ایجاد می‌شود. همچنین تهی‌شدگی عنصر Sr ناشی از جدایش فازهای کانیاپی پلاژیوکلاز از مذاب اولیه بوده که در اثر رخداد مداوم فرایندهای تفریق بلورین، تهی‌شدگی این عنصر تشدید می‌شود.

در طبقه‌بندی میدلموست که بر اساس درصد وزنی  $\text{SiO}_2$  در مقابل مجموع درصد وزنی  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  استوار است، سنگ‌های آذرین درونی منطقه بافق در محدوده گابرودیوریت، مونزونیت، فوئیدگابرو، فوئید مونزوگابرو و سینیت واقع شده‌اند. بر اساس نمودار TAS که برای سنگ‌های آذرین درونی ارائه شده است، سنگ‌های آذرین درونی مورد مطالعه در محدوده‌های ترکیبی سینودیوریت، سینیت، نفلین سینیت، دیوریت و ایژولیت قرار گرفته‌اند. بر اساس طبقه‌بندی دو لا روش و همکاران توده‌های نفوذی منطقه بافق در محدوده گابرو، سینیت، نفلین سینیت، سینودیوریت واقع شدند. در نمودار الگوی به‌هنجار شده عناصر کمیاب به ترکیب گوشته اولیه مونزوسینیت و مونزونیت بی‌هنجاری منفی در عناصر LILE نظیر Sr، Eu و Pb از خود نشان می‌دهند. همچنین عناصر LREE نسبت به HREE دارای غنی‌شدگی هستند تفسیر نمونه‌های سینیت که به گوشته اولیه به‌هنجار شده‌اند، نشان می‌دهد که عناصر گروه HFSE نظیر Y، Zr و Th نسبت به عناصر گروه LILE مانند Sr، Eu و Pb از خود غنی‌شدگی نشان می‌دهند. در نمونه دیوریت پورفیری که به گوشته اولیه به‌هنجار شده است، عناصر LREE از خود بی‌هنجاری منفی نشان می‌دهند. همچنین عناصر گروه LILE نظیر Sr، Eu و Rb از خود آنومالی منفی بروز می‌دهند. الگوی عناصر کمیاب خاکی سنگ‌های نفوذی منطقه به ترکیب کندریت به‌هنجار شده است. این الگوها برای همه نمونه‌ها دارای شیب منفی بوده

( $LREE/HREE > 1$ )، و نشانگر غنی‌شدگی آنها در LREE هستند که از ویژگی‌های ژئوشیمیایی برجسته سنگ‌های آذرین مرتبط با کانسارهای آهن-آپاتیت تیپ کایرونا است.

بر اساس نمودار ایزوپل و باراگار که برای تعیین سرشت ماگمایی سنگ‌های منطقه استفاده شده است نمونه‌های بازالت، توف ریوداسیتی، دیوریت پورفیری و ریولیت در سری مختصرآلکان قرار می‌گیرد. اما نمونه‌های بازالت آندزیتی، مونزوسینیت، سینیت و مونزونیت در سری آلکان واقع شده‌اند. بر اساس نمودار کاتیونی ینسن سنگ‌های آتشفشانی منطقه بیشتر از نوع ریولیت، آندزیت، بازالت، بازالت تولییتی پرمیزیم کالک‌آلکان و بازالت تولییتی پراهن هستند. در نمودار AFM، بخش عمده نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده کالک‌آلکان قرار می‌گیرند. تنها نمونه ریولیت در محدوده تولییتی قرار گرفته است. همچنین بر اساس نمودار دو متغیره هاستی و همکاران که بر اساس عناصر غیرمتحرک Co در مقابل Th ارائه شده است. سنگ‌های منطقه عمدتاً با ماهیت کالک‌آلکان غنی از پتاسیم در موقعیت بازالت آندزیتی، آندزیت تا ریولیت و داسیت قرار گرفتند. در نمودار  $K_2O$  در مقابل  $SiO_2$ ، که سنگ‌های منطقه را بر اساس مقادیر  $SiO_2$  و  $K_2O$  به تقسیمات جزئی‌تری تقسیم می‌کند، بیشتر نمونه‌ها در محدوده شوشونیتی قرار گرفته‌اند. که باید گفت نسبت  $K_2O/Na_2O$  این سنگ‌ها بیشتر از یک می‌باشد که شوشونیت بودن آن را تایید می‌کند. به منظور تعیین خاستگاه زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی منطقه مورد مطالعه سعی شد از نمودار وود استفاده شود. براساس نمودار (Wood, 1980) با استفاده از عناصر کمیاب Nb، Zr، Th، Hf نمونه بازالتی در محیط‌های E-MORB WPT و CAB قرار می‌گیرند ولی براساس شواهد زمین‌شناسی و تکتونیکی منطقه، سنگ‌های آتشفشانی در یک محیط ریفت درون قاره‌ای شکل گرفته‌اند.

## ۸-۵- زمین‌شیمی کانسنگ

تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی کانسنگ‌های منطقه بافق نشان می‌دهد که  $Fe_2O_3$ ،  $P_2O_5$ ، REE و V از عناصر مهم معدنی در منطقه فلززائی بافق هستند. مقدار  $Fe_2O_3$  در کانسنگ مگنتیتی منطقه لکه‌سیاه دارای بیشترین عیار (۹۳ درصد) می‌باشد. کمترین مقدار  $Fe_2O_3$  در کانسنگ‌های غنی از مگنتیت در بین مناطق مذکور مربوط به گزستان (۷۳ درصد) است. مجموع مقادیر عناصر کمیاب خاکی و ایتیریم در کانسنگ‌های غنی از آپاتیت منطقه فلززائی بافق بیشتر از انواع غنی از مگنتیت است به طوری‌که متوسط  $\Sigma REE+Y$  در کانسنگ‌های غنی از مگنتیت ۱۳۱۲ گرم در تن و در کانسنگ‌های غنی از آپاتیت ۹۱۶۰ گرم در تن برآورد می‌گردد. مقدار  $\Sigma REE+Y$  در کانسنگ‌های اسفوردی و گزستان بیشتر از چغارت و لکه‌سیاه است. مقدار  $\Sigma REE+Y$  در کانسنگ‌های مگنتیتی لکه‌سیاه، چغارت، اسفوردی و گزستان به ترتیب ۳۹۶، ۵۹۳، ۹۰۲ و ۳۳۵۹ گرم در تن است، و متوسط مقدار آن در کانسنگ‌های آپاتیتی چغارت، گزستان و اسفوردی به ترتیب ۳۴۳۱، ۹۱۹۹ و ۱۲۰۰۶ گرم در تن است. مقدار وانادیم در کانسنگ‌های غنی از مگنتیت منطقه فلززائی بافق بیشتر از انواع غنی از آپاتیت است به طوری‌که متوسط V در کانسنگ‌های غنی از مگنتیت ۱۴۲۵ گرم در تن و در کانسنگ‌های غنی از آپاتیت 395 گرم در تن برآورد می‌گردد. مقدار  $\Sigma REE+Y$  در کانسنگ‌های چغارت و اسفوردی بیشتر از گزستان و لکه‌سیاه است. مقدار  $\Sigma REE+Y$  در کانسنگ‌های مگنتیتی لکه‌سیاه، گزستان، اسفوردی و چغارت به ترتیب ۷۶۹، ۸۱۸، ۱۸۲۰ و ۲۲۹۴ گرم در تن است، و مقدار آن در کانسنگ‌های آپاتیتی چغارت، گزستان و اسفوردی به ترتیب ۲۱۵، ۳۶۵ و ۶۰۶ گرم در تن است.

بر اساس نمودارهای عنکبوتی و بهنجار شده به گوشته اولیه کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت محدوده‌های معدنی اسفوردی، گزستان، چغارت و لکه‌سیاه الگوهای کاملاً مشابهی دارند که نشان می‌دهد این کانسارها به احتمال زیاد تحت شرایط زمین‌شناسی، سنگ‌شناسی و تکتونیکی واحدی تشکیل شده‌اند. تهی‌شدگی عناصر LIL (Cs, Rb, Ba, Sr) و HFS (Nb, Ta, Ti, Zr) در کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت منطقه مورد مطالعه به ترتیب به دلیل نبود و کمبود کانی‌های

(پلاژیوکلاز، فلدسپات پتاسیم و بیوتیت) و (زیرکن، اسفن، روتیل و ایلمنیت) در ترکیب کانسنگ‌های منطقه می‌باشد. مطالعات کانی‌شناسی بر روی نمونه‌های مقاطع نازک-صیقلی و صیقلی پژوهش حاضر نیز گفته اخیر را تایید می‌نماید.

متوسط غلظت عناصر کمیاب خاکی کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت محدوده‌های اسفوردی، چغارت، گزستان و لکه‌سیاه به ترکیب کندریت به‌هنگار شده است. به طوری‌که در این نمودار مشخص است مقادیر غلظت عناصر کمیاب خاکی کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت اسفوردی و گزستان به مراتب بیشتر از کانسنگ‌های چغارت و لکه‌سیاه است، که این به دلیل درصد بالای فازهایی مثل آپاتیت، مونازیت، آلانیت و ... در کانسارهای اسفوردی و گزستان است. علاوه بر این، الگوی نمودارهای عنکبوتی توزیع عناصر کمیاب خاکی در کانسنگ‌های هر چهار محدوده روند یکسانی داشته و دارای شیب منفی هستند و نشانگر غنی‌شدگی در LREE نسبت به HREE، و دارای بی‌هنگاری منفی می‌باشند. بی-هنگاری منفی Eu به همراه غنی‌شدگی LREE از مشخصه‌های آپاتیت‌های موجود در کانسنگ‌های آهن تیپ کایرونا است. در منطقه فلززائی بافق در طول تبلور بخشی ماگمای مادر اولیه و تقسیم آن به بخش‌های غنی از سیلیس و غنی از آهن و فسفر، عنصر Eu به بخش غنی از سیلیس وارد می‌شود و در فرایند تبلور مذاب غنی از سیلیس این عنصر در ساختمان بلوری پلاژیوکلاز سنگ‌های مافیک تمرکز می‌یابد و به همین خاطر در سنگ‌های مافیک منطقه فلززائی بافق عنصر Eu بی‌هنگاری مثبت نشان می‌دهد و به سمت سنگ‌های حدواسط و فلسیک بی‌هنگاری آن منفی می‌گردد. از اینرو غنی‌شدگی REE (به ویژه LREE و MREE) و فقیرشدگی Eu در کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت (به ویژه کانسنگ‌های غنی از آپاتیت) منطقه فلززائی بافق توجیه می‌گردد.

مقایسه الگوی توزیع عناصر کمیاب خاکی در کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت منطقه بافق (اسفوردی، گزستان، چغارت، و لکه‌سیاه) با کانه‌زایی اکسید آهن-آپاتیت جزیره هرمز بیانگر همانندی کامل آن‌ها با یکدیگر است. از سوی دیگر، مقایسه الگوی توزیع عناصر کمیاب خاکی کانسارهای منطقه فلززائی بافق با کانسارهای نوع کایرونا در جهان (شامل کایرونا، رکتون، هنری، ال‌لاکو، آبوجان، و گریت بیر

لیک) شباهت میان آن‌ها را نشان می‌دهد. همه نمونه‌های مورد مطالعه یک الگوی غنی از LREE با نسبت بالای LREE/HREE را همراه با بی‌هنجاری منفی مشخص در Eu نشان می‌دهند که از ویژگی‌های شاخص کانسارهای مگنتیت-آپاتیت نوع کایرونا است. بررسی ژئوشیمیایی کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت منطقه فلززائی بافق در نمودار Ni برحسب Co نشان می‌دهد که کانه‌زایی منشا ماگمایی-گرماپی دارد. نسبت Ni/Co در سیالات ماگمایی-گرماپی ۰/۲-۷ و در کانسنگ‌های منطقه مورد مطالعه ۰/۵-۲ می‌باشد که دال بر منشا ماگمایی-گرماپی کانسارهای مگنتیت-آپاتیت منطقه دارد. نسبت Sr در برابر Y شامل محدوده گسترده‌ای است که همبستگی شدیدی دارند چرا که با افزایش درجه تفریق ماگمایی میزان Sr کاهش اما میزان Y افزایش می‌یابد. میزان Sr در آپاتیت‌های منطقه مورد مطالعه نسبتاً بالا است که می‌تواند به علت عدم تفریق فازهای جمع‌کننده این عنصر مثل پلاژیوکلاز و همچنین آرایش با سنگ‌های پوسته‌ای در حین صعود ماگما باشد

## ۸-۶- میانبارهای سیال

کانسنگ‌های منطقه فلززایی بافق بر پایه درصدکانی‌های مگنتیت و آپاتیت به انواع غنی از مگنتیت، غنی از آپاتیت و آپاتیت-مگنتیت قابل تقسیم هستند. در مطالعات میانبارهای سیال از کانسنگ‌های هر بخش به‌طور جداگانه برای بررسی میانبارها انتخاب شده است. بر پایه مطالعه مقاطع نازک و نازک صیقلی ۴ نسل آپاتیت در این منطقه شناسایی شده است. آپاتیت‌های نسل‌های اول و دوم در مقایسه با آپاتیت‌های نسل‌های سوم و چهارم بزرگ‌تر و از فراوانی قابل ملاحظه‌ای برخوردار هستند. از اینرو در این پژوهش مطالعه میانبارهای سیال بر روی آپاتیت‌های نسل اول و دوم صورت گرفته است. نتایج مطالعات گرمایش سیالات نشان می‌دهد که تغییرات دمای همگن شدن سیالات در آپاتیت‌های نسل اول بین ۱۳۰ تا ۴۱۰ (میانگین ۲۰۸) درجه سانتی‌گراد در تغییر است. این در حالی است که تغییرات دمای همگن شدن در آپاتیت‌های نسل دوم بین ۱۴۸ تا ۲۶۰ (میانگین ۱۸۱) متغیر می‌باشد. نتایج مطالعات سرمایش سیالات نشان می‌دهد که کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار شوری در آپاتیت‌های نسل

اول به ترتیب ۵/۲۲ و ۲۹/۵۳ (میانگین ۲۰/۲۴) می‌باشد تغییرات درجه شوری در آپاتیت‌های نسل دوم بین ۳/۶۵ تا ۱۹/۰۸ (میانگین ۱۰/۳۶) درصد وزنی معادل نمک طعام در تغییر است. با استفاده از نمودار دوتایی میزان شوری به درجه حرارت یکنواختی می‌توان بدون استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار تا حدودی منشا سیالات کانسار ساز را پیش بینی نمود (Kesler, 2005). همان‌طور که در (شکل ۶-۸) دیده می‌شود اکثریت میانبارهای سیال کانسار آهن-آپاتیت بافق در محدوده سیالات کانسار ساز کانسارهای ماگمایی- گرمابی قرار می‌گیرند این نشان می‌دهد که هر دوی ماگما و سیالات گرمابی مسئول کانه‌زایی فسفات در کانسار آهن-آپاتیت منطقه بافق بوده است. با توجه به میزان شوری میانبارهای سیال احتمال آمیزش این سیالات با یکدیگر و اهمیت هر دو فرایند در کانه‌زایی مطرح می‌گردد. در مواردی که آمیزش سیالات ماگمایی با سیالات گرمابی صورت می‌گیرد درجه شوری میانبارهای سیال تا کمتر از ۲۰ درصد وزنی معادل نمک طعام می‌رسد. بنابراین این امکان وجود دارد که در آمیزش آب‌های ماگمایی با سیالات گرمابی درجه حرارت و شوری سیال ماگمایی کاهش یابد. با توجه به حضور میانبارها در محدوده سیالات کانسار ساز ماگمایی- گرمابی نظریه تشکیل کانه‌زایی فسفات توسط سیالات ماگمایی- گرمابی مورد تایید است.

## ۸-۷- کانسارهای آهن

از نظر زمین‌شناسی اقتصادی عنصر آهن به صورت‌های مختلف در پوسته زمین تشکیل کانسار می‌دهد که مهم‌ترین تیپ‌های کانه‌زایی آن شامل کانسارهای آهن نوع کایرونا، IOCG، اسکارن، BIF، کانسارهای نوع پالپورا، بایان‌اوبو، پلاسری و... می‌باشد در (جدول ۸-۱) ویژگی‌های برخی از انواع مهم کانسارهای آهن به صورت خلاصه آورده شده است.

جدول ۸-۱: طبقه‌بندی کانسارهای اکسید آهن ماگمایی- گرمایی و کانسارهای مس- طلا مرتبط با آنها (Corriveau, 2006; Gandhi, 2003)

Source → Proximal → Distal			
<i>Calc-alkaline magma</i>			
<b>Iron Skarn-type</b>	<b>Kiruna-type</b>	<b>Olympic Dam-type</b>	<b>Cloncurry-type</b>
Massive magnetite- garnet-pyroxene	Massive magnetite-apatite-actinolite	Breccia (one or more stages), magnetite-hematite matrix	Hydrothermal veins & disseminations in older 'ironstones' or FeOx mineralization
Stratabound lensoid & irregular bodies at intrusive contact	Tabular, pipe-like & irregular bodies, dykes & veins	Pipe-like & irregular bodies, vent or fault-controlled	Stratabound, breccia or fault-controlled
Monometallic Fe and related FeOx-Cu-Au deposits	Monometallic Fe & related Cu-FeOx deposits	Polymetallic: Fe, Cu, Au, Ag, REE	Polymetallic: Cu, Au, Ag, Bi, Co, W
Main alteration: Sodic	Main alteration: Sodic	Main alteration: Potassic	Main alteration: Potassic
Magnitogorsk deposit, Russia	Kiirunavaara deposit, Sweden	Olympic Dam deposit, Australia	Osborne & Starra deposits, Australia
Source → Proximal → Distal			
<i>Alkaline-carbonatite magma</i>			
<b>Phalaborwa-type</b>		<b>Bayan Obo-type</b>	
Within or marginal to intrusion		Hosted by country rock	
Veins, layers, disseminations and aggregates; late intrusive phase		Veins, layers, disseminations and aggregates, stratabound lenses	
Low (to moderate) Ti magnetite, apatite, olivine, phlogopite, carbonate, fluorite, Cu sulphides, pyrite, PGE, Au, Ag, uranothorianite, baddeleyite		Magnetite (replacive and/or pre-existing), hematite, bastnaesite, phlogopite, Fe-Ti-Cr-Nb oxides, fluorite, monazite, carbonate	
Zoning in ore; Na & K alteration		Zoning in ore; Na & K alteration	
Phalaborwa deposit, South Africa		Bayan Obo deposit, China	

بر اساس خصوصیات کانسارهای آهن- آپاتیت نوع کایرونا و ویژگی‌های این کانسارها در منطقه مورد مطالعه که در (جدول ۸-۲) ارائه شده است به این نتیجه می‌رسیم که کانسنگ‌های آهن- آپاتیت منطقه بافق مشابه کانسنگ نوع کایرونا می‌باشد.

جدول ۸-۲: ویژگی‌های اصلی کانسارهای مگنتیت-آپاتیت منطقه مورد مطالعه با کانسارهای مگنتیت-آپاتیت تیپ کایرونا مقایسه شده است

خصوصیات	کانسار مگنتیت-آپاتیت تیپ کایرونا	کانسار مگنتیت-آپاتیت بافق ایران مرکزی
محیط تکتونیکی	حاشیه قاره‌ها، محیط‌های فرورانش مرتبط با کمر بند آتش‌فشانی، رژیم‌های تکتونیکی کششی	حوضه‌های ریفتی درون قاره
محدوده سن کانه‌زایی	پالئوپروتروزوئیک تا پلیوسن و پلیستوسن	پرکامبرین پایانی - کامبرین آغازی
سنگ میزبان	سنگ‌های آتش‌فشانی کالک آلکالن تا آلکالن (آندزیت تا ریولیت) و توده‌های پلوتونیک	سنگ‌های آتش‌فشانی اسیدی - حدواسط، سنگ‌های آتش‌فشانی رسوبی
ماهیت ماگماتیسم	ساب آلکالن تا آلکالن، I type	کالک آلکالن تا شوشونیتی
ژئومتری	رگه‌ای، توده‌ای، داربستی	رگه-رگچه‌ای، توده‌ای، دایک مانند، چینه‌سان
کانی‌شناسی	مگنتیت با مقدار Ti و V پایین، هماتیت، آپاتیت، پیریت، اکتینولیت، دیوپسید، کلسیت، کوارتز	مگنتیت، آپاتیت، هماتیت، گوتیت، اولیژیست، اکتینولیت، کلسیت، کوارتز
دگرسانی	سدیک، سدیک-کلسیک، اکتینولیت، سرسیتی، سیلیسی، تورمالینی شدن	سدی-سی، اپی‌دوتی، کلریتی
ساخت و بافت	نواری، توده‌ای، جانشینی	دایک، توده‌ای، جانشینی، دانه پراکنده، رگه-رگچه‌ای
ژنز	جدایی مذاب سیلیکاته و اکسیدی، سیالات هیدروترمالی منشا گرفته از ماگما	سیالات هیدروترمالی (ماگمایی-گرماپی)
منابع	( Daliran, 2002, 2007; Daliran et al., 2010; Edfelt, 2007; Geijer, 1967; Hitzman, 2000; Hitzman et al., 1992)	اطلاعات موجود در تحقیق حاضر

بر اساس مطالعات انجام شده توسط سازمان زمین‌شناسی کشور و محققین مختلف مناطقی را به عنوان نقاط امید بخش برای اکتشاف عناصر نادر خاکی معرفی کرده‌اند. از این مناطق می‌توان به منطقه معدنی بافق در استان یزد، منطقه علی‌آباد- مروارید در استان زنجان، کانسار خانلق در نیشابور و همچنین کانسار آهن-آپاتیت جزیره هرمز اشاره کرد. اطلاعات مربوط به کانسارهای فوق در (جدول ۸-۳) آورده شده است. از دیگر مناطقی که نوع آهن-آپاتیت کایرونا می‌باشند اما در الویت‌های دوم قرار می‌گیرند می‌توان به منطقه نورآباد در استان لرستان، منطقه قروه در استان کردستان، منطقه



سیرجان در استان کرمان، منطقه نی‌ریز در استان فارس و منطقه بهار در استان همدان اشاره کرد (سازمان زمین‌شناسی، ۱۳۹۶).

جدول ۸-۳: مقایسه ویژگی‌های اصلی کانسار مگنتیت- آپاتیت منطقه معدنی بافق با کانسارهای آهن- آپاتیت کایرونا در ایران

مشخصات	کانسار آهن- آپاتیت	کانسار آهن- آپاتیت	کانسار آهن- آپاتیت	کانسارهای آهن- آپاتیت بافق
موقعیت جغرافیایی	۳۵ کیلومتری شمال غربی نیشابور	۲۵ تا ۳۳ کیلومتری جنوب شرقی زنجان	جنوب غرب جزیره هرمز	۳۵ تا ۴۰ کیلومتری شمال شرق بافق
پهنه ساختاری	زون بینالود	کمر بند ماگمایی البرز- آذربایجان	زاگرس چین خورده	ایران مرکزی
جایگاه تکتونیکی	کمر بند آتش فشانی- نفوذی سنوزوئیک قوچان- سبزوار	کمر بند ماگمایی زون فرورانش	حوضه‌های ریفتی واقع در حاشیه فعال قاره گندوانا	حوضه‌های ریفت درون قاره
سن کانه زایی	ائوسن تا پلیو- پلیستوسن	ائوسن بالایی- الیگومیوسن	پرکامبرین پسین- کامبرین پیشین	پرکامبرین پایانی- کامبرین آغازی
سنگ میزبان / همراه	توده‌های نفوذی نیمه عمیق با ترکیب اسیدی- حدواسط	کوارتز موزونیت، مونوزوگرانیت، کوارتز دیوریت، سینوگرانیت	سنگ‌های آتش فشانی، ریولیت تا ریوداسیت، سنگ‌های آتش فشانی رسوبی توف ریولیتی تا ریوداسیتی، شیل کربناته، کریستال توف، سنگ‌های رسوبی مارن	سنگ‌های آتش فشانی اسیدی- حدواسط، سنگ‌های آتش فشانی رسوبی
ژئومتری کانسار	رشته‌ای، رگه- رگچه- ای، توده‌ای، پرکننده فضاهای خالی	توده‌ای، استوک ورک، دایک مانند، رگه- رگچه‌ای	دایک مانند، توده‌ای، انتشاری، رگه- رگچه- ای	رگه- رگچه‌ای، توده‌ای، دایک مانند، چینه‌سان
پاراژنز	مگنتیت، کالکوپیریت، پیریت، آپاتیت، کلسیت، اپیودت	مگنتیت، آپاتیت، بورنیت، پیریت، کالکوپیریت، تورمالین	مگنتیت، هماتیت، آپاتیت، کلسیت، پیریت، گوتیت، لیمونیت	مگنتیت، آپاتیت، هماتیت، گوتیت، اولیژیست، اکتینولیت، کلسیت، کوارتز، پیریت، کالکوپیریت
دگرسانی	کربناتی، سیلیسی، آرژیلیک، پروپیلیتیک	سیلیسی، کلریتی، اکتینولیتی، سرسیتی، آرژیلی	آرژیلیک، سیلیسی، کربناتی، سرسیتی	سیلیسی، اپیدوتی، کلریتی
تیپ	کایرونا	کایرونا	کایرونا	کایرونا
منابع	(Zarei et al., 2016)	(Nabatian et al., 2014)	(فخری، ۱۳۹۷)	اطلاعات موجود در تحقیق حاضر

کانسارهای آهن- آپاتیت نوع ماگمایی- گرمایی در جهان فراوان هستند که از معروفترین آنها می- توان به کانسار بایانابو در چین، معدن mountain pass در شرق کالیفرنیا و کانسار کایروناوارا در شمال شرق سوئد اشاره کرد. در (جدول ۸-۴) به بررسی مشخصات سه کانسار مختلف در مقالاتی که اخیراً به چاپ رسیده است و مقایسه آنها با منطقه مورد مطالعه پرداخته شده است.

جدول ۸-۴: مقایسه ویژگی‌های اصلی کانسار مگنتیت- آپاتیت منطقه معدنی بافق با کانسارهای آهن- آپاتیت تیپ کایرونا در جهان

مشخصات	Kiirunavaara	El Laco	Pea Ridge	کانسارهای آهن- آپاتیت بافق
موقعیت جغرافیایی	شمال سوئد	بین شیلی و پرو	جنوب میسوری در آمریکا	۳۵ تا ۴۰ کیلومتری شمال شرق بافق
سنگ میزبان	فلسیک تا حدواسط ولکانیک‌ها (گروه پورفیری)	فلسیک تا ولکانیک‌های حدواسط (گدازه‌های داسیتی و اندزیتی)	گدازه‌های ریولیتی و توف	سنگ‌های آتش‌فشانی اسیدی- حدواسط، سنگ‌های آتش‌فشانی رسوبی
مجموع کانیایی	مگنتیت، آپاتیت، مونازیت، کوارتز، کلریت، کلسیت، هماتیت	مگنتیت، پیروکسن، آپاتیت، آلبیت، دیوپسید	مگنتیت، اکتینولیت، آپاتیت، کوارتز، کلریت، سرسیت	مگنتیت، آپاتیت، هماتیت، گوتیت، اولیژیست، اکتینولیت، کلسیت، کوارتز
عیار آهن	٪۶۰	٪۶۰	٪۶۵	٪۹۲،۹۷-۴،۶۹
عیار فسفر	٪۰/۹			٪۰،۴۷-۳۵،۵۱
ساخت و بافت	توده‌ای، انتشاری، رگه- رگچه	توده‌ای، پیروکلاستیک، دایک مانند، رگه- رگچه‌ای	توده‌ای، رگه و رگچه‌ای نامنظم	دایک، توده‌ای، جانیشینی، دانه پراکنده، رگه- رگچه‌ای
آلتراسیون	کلسیت، کلریت، آلبیت، اکتینولیت	آلبیت، سیلیس	کلریت، اکتینولیت، سرسیت	سیلیسی، اپیدوتی، کلریتی
تیپ	کایرونا	کایرونا	کایرونا	کایرونا
منبع	Westhues et al., ) (2017	Tornos et al., ) (2017	Harlov et al., ) (2016	اطلاعات موجود در تحقیق حاضر

## ۸-۸ - مراحل تشکیل کانه‌زایی اکسیدهای آهن-آپاتیت در منطقه فلززائی بافق

برای تکوین کانه‌زائی اکسیدهای آهن-آپاتیت منطقه فلززائی بافق مراحل زیر به طور سلسله مراتبی ارائه می‌گردد:

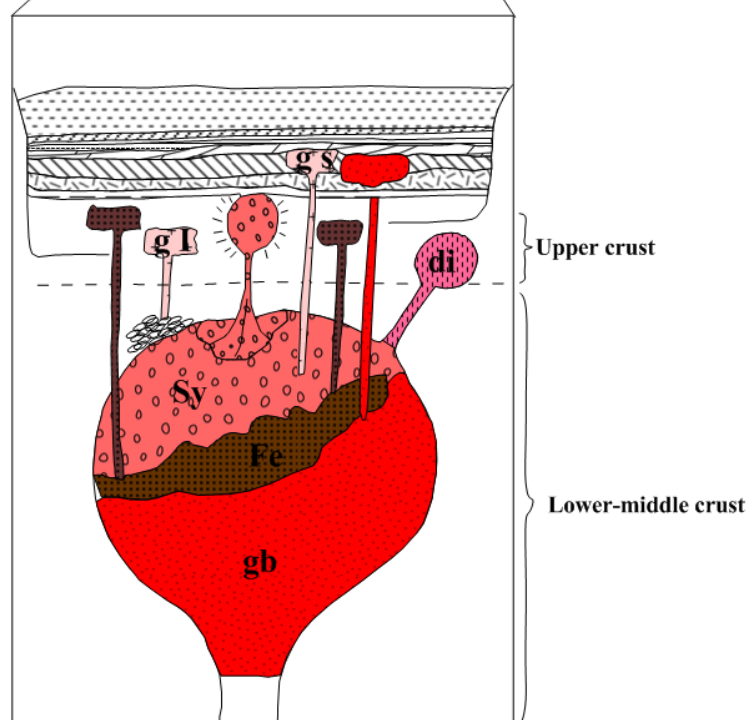
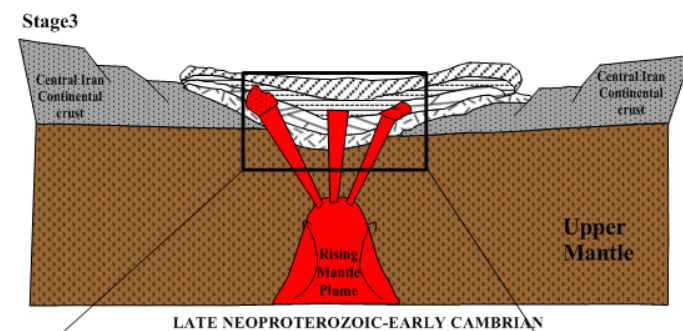
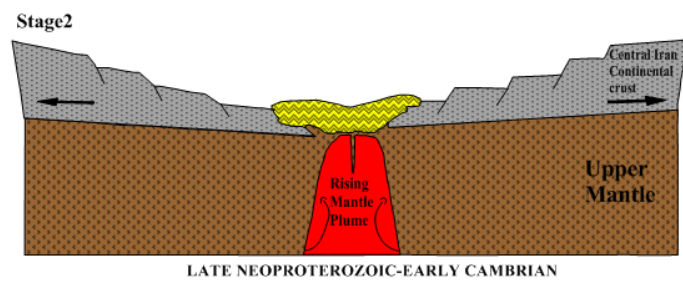
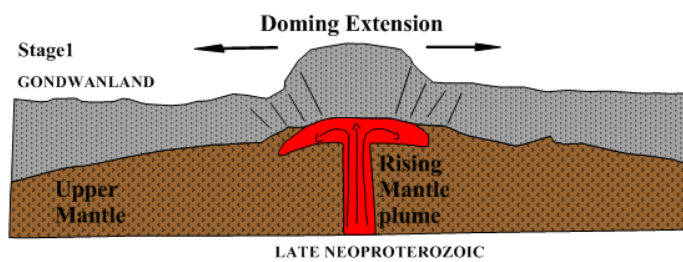
**مرحله اول (بالا آمدگی پوسته قاره‌ای):** در زمان پرکامبرین پسین سرزمین ایران بخشی از ابرقاره گندوانا در حاشیه شمالی آن بوده است. در محدوده‌ی پوسته قاره‌ای ایران، فرایندهای کششی باعث می‌شود پوسته‌ای که در ابتدا ضخیم است، نازک شود و منجر به ایجاد شکستگی شود. شکستگی‌های ایجاد شده در پوسته باعث کم شدن فشار روی گوشته می‌شود. در نهایت با بالا آمدن گوشته فرایند ذوب بخشی صورت می‌گیرد (شکل ۸-۱ مرحله اول).

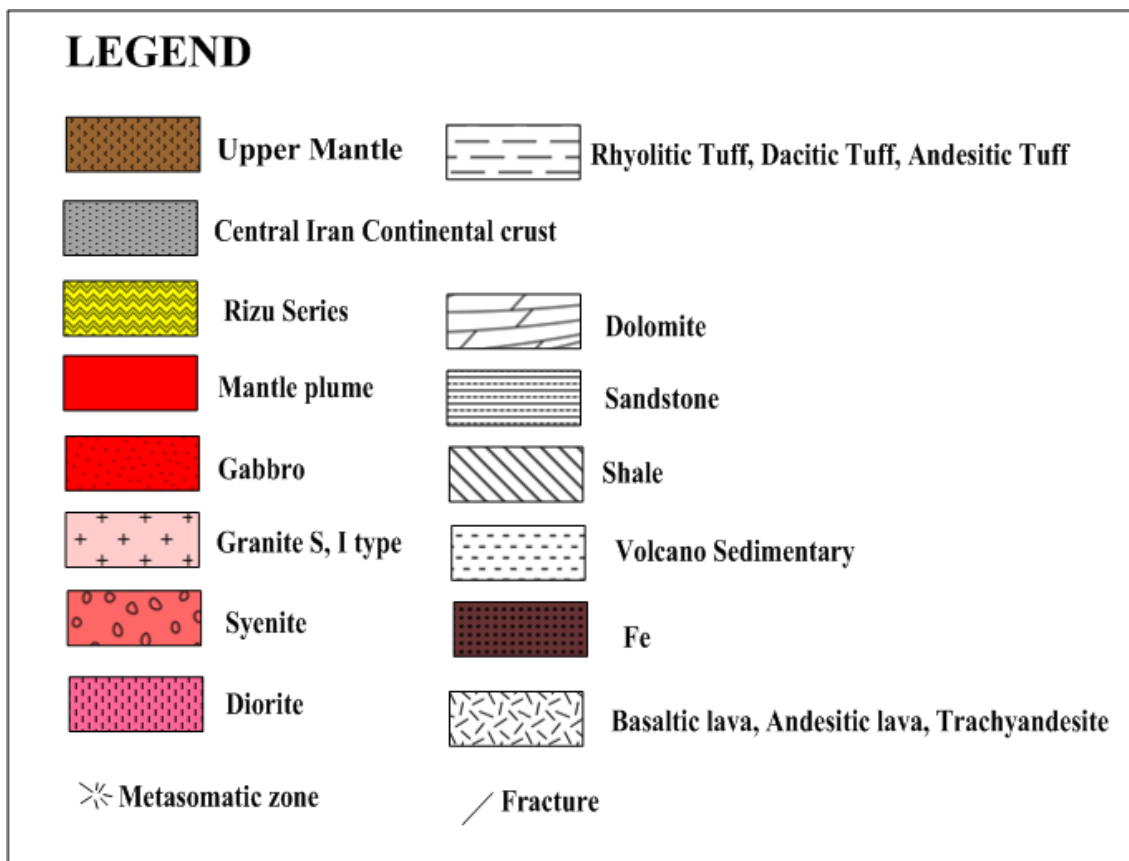
**مرحله دوم (فعالیت‌های کششی و گسل‌خوردگی پوسته قاره‌ای):** در این مرحله گسل-خوردگی‌ها و فعالیت‌های کششی توسعه پیدا کرده و حوضه‌های رسوبی-آتشفشانی درون قاره‌ای تشکیل می‌شوند. پیامد این کشش منجر به فرونشست و تراوش ماگمای بازالتی به خارج می‌شود. ترکیب این نوع بازالت‌ها نیز از نوع آکالان است. با توسعه ریفت درون قاره‌ای سری از سنگ‌های آتشفشانی، رسوبی و تبخیری در این حوضه‌ها نهشته می‌گردد. از مثال‌های شاخص این رخداد زمین-شناسی در ایران می‌توان بلوک بافق-پشت‌بادام و منطقه هرمز را نام برد (شکل ۸-۱ مرحله دوم).

**مرحله سوم (فعالیت‌های ماگمایی-گرماپی):** مرحله فعالیت‌های آتشفشانی در حوضه‌های رسوبی درون قاره‌ای به تدریج به فعالیت‌های ماگمایی و نفوذی تغییر می‌یابند. در این نوع محیط‌های زمین-ساختی، ماگمای مادر ترکیب مافیکی آکالان دارد. در ماگماهای آبدار با فشار بخشی اکسیژن بالا، مگنتیت اولین کانی است که ترجیحاً متبلور می‌شود (Bergbauer and Martel, 1999). همینکه ماگما به سطح معینی صعود می‌نماید، مذاب هموزن باقیمانده دانه‌های مگنتیت متبلور شده را احاطه می‌نماید (کانه‌زائی مگنتیت با ساخت و بافت دانه‌پراکنده در این مرحله تشکیل می‌شود). در این گامه، مذاب باقیمانده متحمل ناآمیختگی شده و مذاب غنی از آهن و مذاب غنی از سیلیس بوجود می‌آید. در طول فرایند ناآمیختگی مایعات، عناصر فرار از قبیل S, Cl, F و P به شدت وارد مذاب غنی از آهن

می‌شوند (McIntosh et al., 2013)، و حضور عناصر فرار به طور قابل ملاحظه‌ای چگالی مایعات را کاهش می‌دهد (Goldstein and Francis, 2008)، و بدین ترتیب ساخت قارچی شکل غنی از آهن که محتوی دانه‌های مگنتیت و مذاب آهن-فسفر با درصد بالایی از مواد فرار است، ساخته می‌شود (کانسنگ‌های توده‌ای مگنتیت - آپاتیت با منشا ماگمایی در این مرحله بوجود می‌آید). مذاب غنی از آهن در مقایسه با ماگمای غنی از Si همزمان، از چگالی بیشتری برخوردار است. زمانیکه مذاب‌های غنی از آهن و مواد فرار به عمق‌های کمتر صعود می‌کند، کاهش درجه حرارت و فشار سبب از دست رفتن گاز و دفع سیالات ماگمایی-گرمایی غنی از F و Cl از توده غنی از آهن می‌شود. سیالات ماگمایی-گرمایی غنی از F و Cl با توده مگنتیتی سخت شده واکنش نموده، و به فاز آهن-فسفر بینابینی تغییر ماهیت می‌دهند، و سبب کاهش قابل ملاحظه در مقدار تیتانیوم، کروم و دیگر عناصر کمیاب مگنتیت‌های اولیه می‌شوند (کانی‌های مگنتیت و آپاتیت نسل دوم که فضاهای میان مگنتیت و آپاتیت‌های نسل اول را پر می‌کنند در این مرحله تشکیل می‌شوند که به نوبه خود توسط رگه-رگچه‌های مگنتیت و آپاتیت دنبال می‌شوند (شکل ۸-۱ مرحله سوم)).

**مرحله چهارم (چین خوردگی، گسلش و فرسایش):** در نهایت پس از تشکیل سری آتشفشانی-رسوبی ریزو توده‌های آذرین و کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت به دلیل فعالیت‌های تکتونیکی، عملکرد گسل‌ها، هوازدگی و فرسایش سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی، نفوذی‌ها و کانسنگ‌ها در سطح زمین نمایان گشته و مورفولوژی عهد حاضر را پیدا نموده‌اند (شکل ۸-۱ مرحله چهارم).



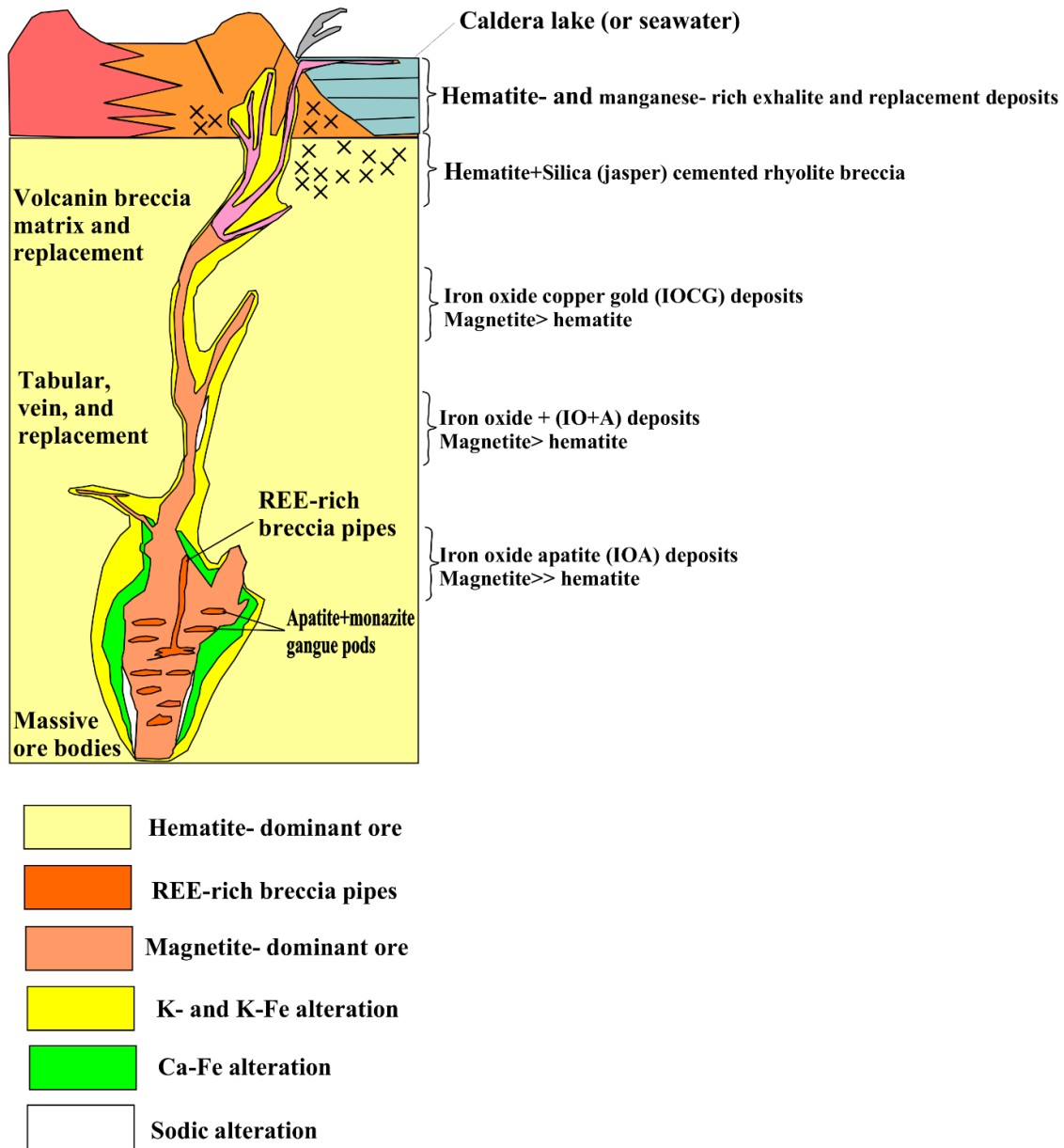


شکل ۸-۱: مراحل مختلف تشکیل و پیدایش منطقه فلززایی بافق از دیدگاه زمین‌شناسی

## مدل تشکیل کانسارهای IOA و IOCG

برای نمایش چگونگی تشکیل کانسارهای آهن-آپاتیت مدل‌های مختلفی توسط ( Ayuso et al., 2016; Childress et al., 2016; Hofstra et al., 2016; Johnson et al., 2016; McCafferty et al., 2016; Neymark et al., 2016) ارائه شده است که باعث افزایش شناخت ما از نحوه تشکیل این کانسارها می‌شود. به‌طور کلی در این کانسارها هرچه به عمق می‌رویم و درجه حرارت بیش‌تر می‌شود، کانسنگ‌های مگنتیتی شکل می‌گیرند که معمولاً با آپاتیت نیز همراهی می‌شوند. اما هرچه به سطح می‌رویم و از عمق و درجه حرارت کاسته می‌شود باعث تشکیل کانسارهای IOCG می‌شود. با کم شدن عمق و فشار در قسمت‌های سطحی شاهد بروز کانسارهای آهن منگنز نواری هستیم و این نشان دهنده این است که بین این سه نوع کانسارهایی یک ارتباط ژنتیکی وجود دارد (شکل ۸-۲). مدل تشکیل کانسارهای IOA با نحوه شکل‌گیری کانسارهای منطقه فلززایی بافق همخوانی دارد با این تفاوت که براساس شواهد صحرایی و مطالعات انجام گرفته تیپ کانسارهایی IOCG در منطقه بافق

شناسایی نشده است اما به دلیل این که در اکثر مدل‌های تیپ کاپرونا کانسارهای IOCG نیز آن‌ها را همراهی می‌کنند این می‌تواند به عنوان یک پیشنهاد اکتشافی در منطقه فلززایی بافق باشد.



شکل ۸-۲: مدل شماتیک نحوه تشکیل کانسارهای نوع IOA و IOCG با تغییرات از (Johnson et al., 2016)

## مدل تشکیل مگنتیت در کانسارهای اکسید آهن آپاتیت تیپ کایرونا

شکل شماتیکی زیر مدل مگنتیت- شناور (magnetite- flotation model) را برای کانسارهای اکسید آهن آپاتیت تیپ کایرونا تشریح می‌نماید.

مرحله اول: مگنتیت‌های با منشأ آذرین اولیه در یک مخزن ماگمایی از مذاب سیلیکاتی تبلور می‌یابد. کریستال‌های مگنتیت به دلیل وزن مخصوص زیاد نسبت به مذاب به کف مخزن ماگمایی فرو می‌روند (شکل ۳-۸ الف)

مرحله دوم: اگر کریستال شور در طول کاهش و رفع فشار خارج شود، هسته‌های حباب روی کریستال‌های مگنتیت به دلیل خاصیت مرطوب‌کنندگی تشکیل می‌گردد (شکل ۳-۸ ب)

مرحله سوم: در این مرحله جفت‌های مگنتیت- حباب تشکیل می‌شوند و به‌صورت شناور به سمت بخش‌های فوقانی مخزن ماگمایی صعود می‌نمایند و به‌صورت یک بخش معلق مگنتیت-سیال در درون ماگما جدا می‌شوند (شکل ۳-۸ پ).

اگر تنش‌های تکتونیکی- کششی منجر به ایجاد شکستگی‌های پوسته‌ای گردد، بخش مگنتیت-سیال از مخزن ماگمایی جدا شده و در درجه حرارت و فشار پایین در امتداد شکستگی‌های پوسته‌ای ته‌نشست می‌یابند و کریستال‌های مگنتیت با منشأ آذرین اولیه را احاطه می‌نمایند (شکل ۳-۸ ت).

همان‌طور که پیش‌تر به آن اشاره کردیم سه نسل مگنتیت برای منطقه معدنی بافق شناسایی شد، بنابراین مدل فوق برای منطقه مورد مطالعه صادق است.

به عبارت دیگر مراحل فوق را می‌توانیم بگوییم:

۱- مرحله اول تشکیل مگنتیت دمای بالا

۲- ایجاد افروشته بلوری غنی از مگنتیت و آپاتیت

۳- جدایش افروشته بلوری غنی از مگنتیت و آپاتیت از مذاب سیلیکاته و تجمع آن در کف

مخزن



۴- بالا رفتن فشار فاز سیال در اثر جوشش اولیه ناشی از کاهش فشار و صعود ماگما و جوشش

ثانویه ناشی از تبلور مذاب

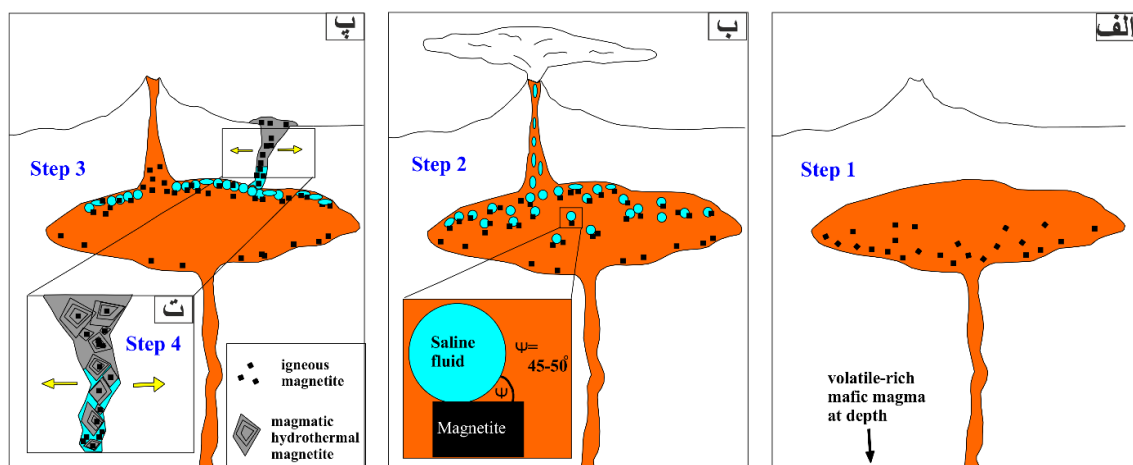
۵- هسته‌بندی ناهمگن حباب‌های فاز سیال به صورت ناهمگن بر روی بلورهای مگنتیت و آپاتیت

و بنابراین ایجاد نیروی شناوری برای صعود افروشته مگنتیت و آپاتیت

۶- جدایش و جایگزینی افروشته مگنتیت و آپاتیت در شکستگی‌های تکتونیکی بر اثر فشارهای

تکتونیکی و فشار فاز سیال

۷- تاثیر و دخالت فاز سیال غنی از  $CO_2$  در غنی‌شدگی آپاتیت‌ها از REE به روش متاسوماتیک



شکل ۸-۳: مدل شماتیک تشکیل مگنتیت در کانسارهای اکسید آهن آپاتیت تیپ کایرونا با تغییرات از (Knipping et al., 2019)

## ۸-۹- نتیجه‌گیری

- در منطقه فلززایی بافق سری آتشفشانی- رسوبی ریزو میزبان توده‌های نفوذی و کانسنگ- های مگنتیت- آپاتیت می‌باشد.

- براساس شواهد صحرایی و مطالعات انجام گرفته سری ریزو تناوبی از سنگ‌های دولومیتی، ماسه سنگ، ماسه سنگ توفی، شیل، گدازه و توف‌های بازالتی، گدازه و توف‌های ریولیتی، ریوداسیتی تا آندزیتی، متاسوماتیت‌ها را شامل می‌شود.

- ترکیب توده‌های نفوذی در منطقه فلززایی بافق شامل سینیت، گرانیت، دیوریت، گابرو، دیاباز،

مونوزوسینیت و مونزونیت است، که در این میان سینیت‌ها از گسترش قابل ملاحظه‌ای برخوردار هستند.

- داده‌های ژئوشیمیایی سنگ کل، تشکیل سنگ‌های آذرین منطقه در یک محیط ریفت درون قاره‌ای نشان می‌دهند.

- سنگ‌های متاسوماتیتی به عنوان سنگ میزبان کانسنگ‌های آهن و آپاتیت منطقه معدنی بافق شناخته می‌شوند. برپایه شواهد سنگ‌شناسی اکتینولیت، ترمولیت، هورنبلند، کلسیت، کلریت، و اپیدوت ترکیب کانی‌شناسی اصلی آن‌ها را تشکیل می‌دهند.

- مگنتیت و آپاتیت تشکیل دهنده‌های اصلی کانسارهای منطقه بافق می‌باشند، و براساس درصدهای این کانی‌ها کانسنگ‌ها به انواع غنی از مگنتیت، مگنتیت-آپاتیت و آپاتیت تقسیم می‌گردد.

- عیار  $Fe_2O_3$  از ۸/۶۸٪ در کانسنگ‌های غنی از آپاتیت تا ۹۰/۶۵٪ در کانسنگ‌های غنی از مگنتیت متغیر است. همچنین میزان عیار  $P_2O_5$  نیز از ۰/۴۷٪ در کانسنگ‌های غنی از مگنتیت تا ۳۵/۵۱٪ در کانسنگ‌های غنی از آپاتیت تغییر می‌کند. مقدار بیشینه غلظت مجموع REE (۱۴۶۷ گرم در تن) به کانسنگ‌های غنی از آپاتیت مربوط می‌شود.

- الگوی بهنجار شده عناصر خاکی کمیاب در کانسنگ‌های منطقه بافق شبیه به هم بوده، و غنی‌شدگی عناصر خاکی کمیاب سبک به سنگین و ناهنجاری منفی Eu در آن‌ها نمایان است.

- میزان دما و شوری در آپاتیت‌های نسل اول بیش‌تر از نسل دوم است، که کاهش شوری در آپاتیت نسل دوم می‌تواند حاصل از اختلاط سیال‌های ماگمایی با آب‌های جوی در مراحل تأخیری کانه‌زایی باشد.

- شواهد کانی‌شناسی، بافتی، ژئوشیمی و میانبارهای سیال نشان می‌دهد که ترکیبی از فرایندهای ماگمایی و گرمایی در شکل‌گیری کانسارهای منطقه بافق نقش دارند.

- مقایسه ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و میانبارهای سیال کانسارهای منطقه بافق با انواع کانسارهای آهن در ایران و سایر نقاط جهان مشابهت آن‌ها را با کانسارهای اکسید

آهن- آپاتیت نوع کایرونا اثبات می کند.

## ۸-۱۰- پیشنهادها

- ۱- تکمیل مطالعات میانبرهای سیال بر روی نسل‌های مختلف آپاتیت در کانسنگ‌های آهن-آپاتیته منطقه و در صورت امکان تجزیه شیمیایی میانبرهای سیال با استفاده از روش‌های دستگاهی پیشرفته.
- ۲- تجزیه شیمیایی نقطه‌ای بر روی کانی‌های پیرولوسیت، هماتیت و اولیژست از کانسنگ‌های آهن نواری، و نسل‌های چندگانه مگنتیت، آپاتیت و پیریت از کانسنگ‌های آهن-آپاتیت ماگمایی با استفاده از دستگاه میکروپروپ.
- ۳- مطالعات ایزوتوپی اکسیژن بر روی کانی‌های اکسیدی مثل اولیژست و مگنتیت برای تعیین منشأ سیال کانه‌ساز و شرایط فیزیکوشیمیایی تشکیل کانسار.
- ۴- مطالعات ایزوتوپی ناپایدار (اورانیوم-سرب، سرب-سرب و ...) بر روی سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی برای تعیین سن مطلق
- ۵- مطالعات ایزوتوپی اکسیژن و دوتریوم روی ترمولیت-اکتینولیت و مطالعات ایزوتوپی کربن و اکسیژن روی کلسیت از متاسوماتیت‌ها برای تعیین منشأ سیالات متاسوماتیکی و کانه‌ساز.



منابع

- آقاباتی، ع.، (۱۳۸۳) "زمین شناسی ایران". سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- آقاباتی، ع.، (۱۳۸۵) "زمین شناسی ایران". سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- افتخار نژاد، ج.، (۱۳۵۹) "تفکیک بخش های مختلف ایران از نظر وضع ساختمانی در ارتباط با حوضه های رسوبی". نشریه انجمن نفت، شماره مجله، دوره، ۱۹-۲۸.
- افضلی، س.، نظافتی، ن.، قادری، م.، قلمقاش، ج.، قاسمی، م. ر.، کریمی باوندپور، ع.، (۱۳۹۳) "سنگ زایی و کانه زایی در کانسار اکسید آهن آپاتیت دار گزستان، خاور بافق، ایران مرکزی". فصلنامه علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، شماره ۹۳، صفحات ۷۷-۸۴.
- امینی، ب.، (۱۳۸۳) "نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بافق".
- اهری پور، ر.، (۱۳۸۵) "مبانی رسوب شناسی (علوی)". ۳۵۰ صفحه.
- ایرانمنش، س.، طالع فاضل، ا.، هزاره، م. ح.، مجیدی، ا.، (۱۳۹۸) "بررسی رشد بلورهای موناژیت و تامین عناصر خاکی نادر از کانی آپاتیت: مطالعه موردی در کانسار آهن-آپاتیت اسفوردی (شمال شرق بافق)". مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران، ۲۷.
- حافظیان، گ.، جمالی، ح.، (۱۳۹۴) "ژئوشیمی و خاستگاه کانسار مگنتیت-آپاتیت گزستان، شرق بافق" مجله پترولوژی، شماره ۲۴، صفحات ۳۹-۶۴.
- حسینی پاک، ع.، ا.، (۱۳۸۹) "اصول اکتشافات ژئوشیمیایی". انتشارات دانشگاه امیر کبیر.
- حمدی، ب.، (۱۳۷۴) "سنگ های رسوبی پرکامبرین - کامبرین ایران".
- حیدری، ب.، (۱۳۵۷) "بررسی ولکانیسم منطقه اسفوردی و زیرگان ایران مرکزی". دانشگاه شهید بهشتی.
- درویش زاده، ع.، آل طه، ب.، (۱۳۷۵) "ماگماتیسم و تکتونوماگماتیسم پرکامبرین پسین در ایران مرکزی". مجله علوم دانشگاه تهران، شماره ۱، صفحات ۵۷-۷۸.
- درویش زاده، ع.، (۱۳۶۲) "بررسی فسفات بافق - اسفوردی". نشریه دانشکده علوم، دانشگاه تهران، سیزدهم، ۲-۲۴.
- درویش زاده، ع.، (۱۳۷۰) "زمین شناسی ایران". نشر دانش امروز.
- دری، م. ب.، جمالی، ح.، (۱۳۸۲) "گزارش اکتشافات مرحله عمومی (نیمه تفصیلی) در کانسار فسفات - خاک های نادر گزستان".
- دری، م. ب.، سپهری راد، ر.، جمالی، ح.، (۱۳۸۷) "گزارش اکتشافات تفصیلی در کانسار فسفات خاک های نادر

## گزستان".

- رجب زاده، م. ع.، حسینی، ک.، موسوی نسب، ز.، (۱۳۹۳) "مطالعه کانی شناسی و زمین شیمی آپاتیت و سنگ های میزبان فسفات در کانسار اسفوردی استان یزد با هدف تعیین منشا و خاستگاه آپاتیت". ۶، ۳۳۱-۳۵۳.
- رستمی، م.، طالع فاضل، ا.، (۱۳۹۷) "ژئوشیمی، کانه زایی و دگرسانی قلیایی- اکسید آهن در کانسار آهن  $\pm$  آپاتیت لکه سیاه (شمال شرق بافق) ایالت فلرزایی بافق- ساغند". زمین شناسی اقتصادی، ۱۰، صفحات ۵۸۷-۶۱۶.
- رضائی، ج.، قادری، م.، (۱۳۸۱) "کانی سازی آهن-فسفات کامبرین در ناحیه معدنی بافق، شرق ایران مرکزی". بیستمین گردهمایی علوم زمین.
- سازمان زمین شناسی کشور، (۱۳۸۶) "نقشه و گزارش زمین شناسی ۱/۲۵۰۰۰ علی آباد". شماره 7154 IV NE، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- سامانی، ب.، ژوئی، چ.، سوتائو، گ.، گوان، ت.، (۱۳۷۲) "زمین شناسی پرکامبرین در ایران مرکزی از دیدگاه چینه نگاری، ماگماتیسیم و دگرگونی". فصلنامه علوم زمین، شماره ۱۰، صفحات ۴۰-۶۳.
- سامانی، ب.، (۱۳۶۴) "کشف ماگماتیسیم کربناتیته و پدیده های همراه آن در ایران و ارتباط آن ها با کانسارهای منطقه بافق- ساغند". نشریه علمی سازمان انرژی اتمی ایران، شماره ۴، صفحات ۹۹-۱۰۷.
- سامانی، ب.، (۱۳۷۱) "معرفی سازند ساغند با رخساره ریفتی و جایگاه چینه نگاری آن در پرکامبرین پسن ایران مرکزی". فصلنامه علوم زمین، شماره ۶، صفحات ۳۲-۴۵.
- سامانی، ب.، (۱۳۷۷) "متالوژنی پرکامبرین در ایران (بخش اول)". نشریه علمی سازمان انرژی اتمی ایران، شماره ۱۷.
- سامانی، ب.، باباخانی، ع.، (۱۳۶۹) "تکوین زمین شناسی ناحیه بافق- ساغند و مدل متالوژنی کانسارهای آهن- آپاتیت و مواد پرتوزا" نهمین گردهمایی علوم زمین، صفحات ۲۴-۲۵.
- سامانی، ب.، (۱۳۷۸) "فلرزایی عناصر نادر خاکی در پرکامبرین ایران مرکزی". نشریه علمی سازمان انرژی اتمی ایران، شماره ۲۰، صفحات ۱۵-۲۱.
- سهیلی، م.، مهدوی، م.، (۱۳۷۰) "نقشه زمین شناسی اسفوردی قیاس ۱:۱۰۰۰۰۰". سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

هوشمندزاده، ع.، (۱۳۶۷) "مقدمه ای بر زمین شناسی ناحیه بیابانک- بافق". وزارت معدن و فلزات.

عابدیان، ن.، (۱۳۶۲) "اکتشاف مقدماتی رخنمون های آپاتیت در منطقه بافق- پشت بادام". سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

دهقانزاده، بافقی، ع. ا.، کوهساری، ا. ح.، محمد، تراب، ف.، (۱۳۹۷) "بررسی زمین شیمی و کانه زایی آهن و آپاتیت برای شناخت عناصر خاکی نادر در کانسار گزستان منطقه بافق (استان یزد)". مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران، ۲۶، صفحات ۸۸۵-۹۰۰.

فخری دودویی، ع.، (۱۳۷۹) "زمین شناسی اقتصادی و ژئوشیمی واحد H4 سری هرمز، جزیره هرمز". دانشگاه صنعتی شاهرود.

فرحندی سرخ آبیف ک.، (۱۳۷۷) "بررسی پراکندگی عناصر نادر خاکی (REE) و نیوبیم در کانسار های آهن آپاتیت منطقه بافق". دانشگاه شهید بهشتی.

قائمیف ف.، سعیدی، ع.، (۱۳۸۵) "نقشه زمین شناسی چهارگوش ۱/۱۰۰۰۰۰ چادرملو شماره ۷۱۵۴". سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.

قربانی، م.، (۱۳۸۶) "زمین شناسی اقتصادی ذخایر معدنی و طبیعی ایران". انتشارات آرین زمین.

مجیدی، ج.، باباخانی، ع.ر.، (۱۳۷۹) "نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ آریز" سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

کره ای، م.ت.، قریب، ف.، (۱۳۹۵) "مطالعات دفتری- صحرایی جهت شناسایی محدوده های امید بخش کانی سازی عناصر نادر خاکی در استان یزد".

کره ای، م. ت.، قریب، ف.، (۱۳۹۵) "اکتشاف عناصر نادر خاکی در ایران، اکتشاف مقدماتی در پهنه البرز مرکزی جهت شناسایی پتانسیل های کانی سازی عناصر نادر خاکی".

مختاری، م. ع. ا.، امامی، م. ه.، رحمانی، ش.، (۱۳۸۲) "کانی زایی عناصر نادر خاکی در منطقه بافق- پشت بادام". بیست و دومین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

مختاری، م. ع. ا.، رحمانی، ش.، (۱۳۸۱) "اکتشاف عناصر کمیاب فلزی و کانی های قیمتی" سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

مر، ف.، دهقانی، ه.، (۱۳۷۸) "زمین شناسی و منشأ احتمالی کانسار اسفوردی بافق، استان یزد". سومین همایش انجمن زمین شناسی ایران.

نبوی ف م. ج.، (۱۳۵۵) "دیباچه ای بر زمین شناسی ایران". انتشارات سازمان زمین شناسی کشور.



- Alavi, M., (1991) **"Tectonics of the Middle East, Scale 1: 15000000"**. Geol. Surv, Iran, Tehran.
- Andreoli, M.A.G., Smith, C.B., Watkeys, M., Moore, J.M., Ashwal, L.D., Hart, R.J., (1994) **"The geology of the Steenkampskraal monazite deposit, South Africa; implications for REE-Th-Cu mineralization in charnockite-granulite terranes"**. *Econ. Geol.*, 89, p: 994–1016.
- Audetat, A., Günther, D., Heinrich, C.A., (1998) **"Formation of a magmatic-hydrothermal ore deposit: Insights with LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions"**. *Science* (80) 279, p: 2091–2094.
- Audetat, A., Pettke, T., Heinrich, C.A., Bodnar, R.J., (2008) **"Special paper: the composition of magmatic-hydrothermal fluids in barren and mineralized intrusions"**. *Econ. Geol.*, 103, 877–908.
- Ayuso, R.A., Slack, J.F., Day, W.C., and McCafferty, A.E. (2016). **"Geochemistry, Nd-Pb isotopes, and Pb-Pb ages of the Mesoproterozoic Pea Ridge iron oxide-apatite–rare earth element deposit, southeast Missouri"**. *Econ. Geol.* 111, 1935–1962
- Bajwah, Z.U., Seccombe, P.K., Offler, R., (1987) **"Trace element distribution, Co: Ni ratios and genesis of the Big Cadia iron-copper deposit, New South Wales, Australia"**. *Miner. Depos.*, 22, p:292–300.
- Barnes, H.L., (1997) **"Geochemistry of hydrothermal ore deposits (John Wiley & Sons)"**.
- Belousova, E.A., Griffin, W.L., O'Reilly, S.Y., Fisher, N.I., (2002) **"Apatite as an indicator mineral for mineral exploration: trace-element compositions and their relationship to host rock type"**. *J. Geochemical Explor.*, 76, p: 45–69.
- Berberian, M., King, G.C. P., (1981) **"Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran"**. *Reply. Can. J. Earth Sci.*, 18, p:1764–1766.
- Bergbauer, S., Martel, S.J., (1999) **"Formation of joints in cooling plutons"**. *J. Struct. Geol.* 21, 821–835.
- Bischoff, James L., and Robert J. Rosenbauer. **"An empirical equation of state for hydrothermal seawater (3.2 percent NaCl)."** *American Journal of Science* 285.8 (1985): 725-763
- Bonyad, Z., Davidson, G. J., Mehrabi, B., Meffre, S., Ghazban, F., (2011) **"Significance of apatite REE depletion and monazite inclusions in the brecciated Se–Chahun iron**

- oxide-apatite deposit, Bafq district, Iran: insights from paragenesis and geochemistry".** Chem. Geol, 281, p: 253–269.
- Boomeri, M., (2012) **"Rare earth minerals in Esfordi magnetite-apatite ore deposit"**. Bafq district.
- Borumandi, H., (1973) **"Petrographische und lagerstättenkundliche Untersuchungen der Esfordi-Formation zwischen Mishdovan und Kushk bei Bafq/Zentraliran"**. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.
- Boulin, J., (1991) **"Structures in Southwest Asia and evolution of the eastern Tethys"**. Tectonophysics, 196, p:211–268.
- Boynton, W.V., (1984) **"Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In Developments in Geochemistry"**. (Elsevier), p: 63–114.
- Chen, zui., (1994) **"Evaluation of apatite mineralization potential in central Iran. Remote Sensing Project Iranian ministry of mine internal report"**.
- Childress, T.M., Simon, A.C., Day, W.C., Lundstrom, C.C., and Bindeman, I.N. (2016). **"Iron and oxygen isotope signatures of the Pea Ridge and Pilot Knob magnetite-apatite deposits, southeast Missouri", USA. Econ. Geol. 111, 2033–2044**
- Corriveau, L., (2006) **"Iron oxide copper-gold ( $\pm$ Ag $\pm$ Nb $\pm$ P $\pm$ REE $\pm$ U) deposits: a Canadian perspective. Miner. Depos. Canada. Consol. Synth. Miner. Depos. Knowledge. Ottawa, Ontario Geol. Surv. Canada, p: 1–23.**
- Cox, K.G., (1979) **"The interpretation of igneous rocks (Springer Science & Business Media)"**.
- Daliran, F., (1990) **"The magnetite-apatite deposit of Mishdovan, east central Iran: an alkali rhyolite hosted," Kiruna type" occurrence in the Infracambrian Bafq metalotect (mineralogic, petrographic and geochemical study of the ores and the host rocks)"**. Ruprecht-Karls-Universität.
- Daliran, F., (2002) **"Kiruna-type iron oxide-apatite ores and apatites of the Bafq district, Iran, with an emphasis on the REE geochemistry of their apatites. Hydrothermal Iron Oxide Copp"**. Gold Relat. Depos. a Glob. Perspect. 2, p: 303–320.
- Daliran, F., (2007) **"Multistage metasomatism and mineralization at hydrothermal Fe oxide-REE-apatite deposits and" apatites" of the Bafq district, centraleast Iran"**. In Digging Deeper, Proc. 9th Biennial SGA Meeting Dublin, 2007, p: 1501–1504.
- Daliran, F., Stosch, H.G., Williams, P., Jamali, H., Dorri, M.B., Corriveau, L., Mumin, A.H.,

- (2010) **"Early Cambrian iron oxide-apatite-REE (U) deposits of the Bafq district, east-central Iran. Explor. Iron Oxide Copper-Gold Depos"**. Canada Glob. Analog. (L. Corriveau H. Mumin, Eds.). Geol. Assoc. Canada Short Course Notes 20, p:143–155.
- Dare, S.A.S., Barnes, S.J., Beaudoin, G., (2015) **"Did the massive magnetite “lava flows” of El Laco (Chile) form by magmatic or hydrothermal processes? New constraints from magnetite composition by LA-ICP-MS"**. Miner. Depos, 50, 607–617.
- Dehganzadeh Bafghi, A., Kohsary, A., Mohhammad Torab, F., (2019) **"Study of apatite and iron geochemistry and mineralization for identification of the rare earth elements deposit, Gazestan in Bafgh region (Yazd Province). Iran"**. J. Crystallogr. Mineral, 26, p: 885–900.
- Driesner, T., Heinrich, C.A., (2007) **"The system H<sub>2</sub>O–NaCl. Part I: Correlation formulae for phase relations in temperature–pressure–composition space from 0 to 1000 C, 0 to 5000 bar, and 0 to 1 XNaCl"**. Geochim. Cosmochim. Acta, 71, p:4880–490.
- Dupuis, C., Beaudoin, G., (2011) **"Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types"**. Miner. Depos, 46, p:319–335.
- Edfelt, Å., (2007) **"The Tjärrojjåkka apatite-iron and Cu (-Au) deposits, northern Sweden: products of one ore forming event"**.
- Eslamizadeh, A., (2016) **"Petrology and geochemistry of early Cambrian volcanic rocks hosting the Kiruna-type iron ore in Anomaly 10 of Sechahun, Central Iran"**. J. Sci. Islam. Repub, Iran, 28, p:21–35.
- Foley, S.F., Wheller, G.E., (1990) **"Parallels in the origin of the geochemical signatures of island arc volcanics and continental potassic igneous rocks: the role of residual titanates"** Chem. Geol, 85, p:1–18.
- Folk, R. L., (1962) **"Spectral subdivision of limestone types"** .
- Förster, H., Jafarzadeh, A., (1984) **"The Chador Malu Iron Ore Deposit (Bafq District, Central Iran), Magnetite Filled Pipes "**. Neues Jahrb. Für Geol. Und Paläontologie-Abhandlungen, p: 524–534.
- Frietsch, R., Perdahl, J.A., (1995) **"Rare earth elements in apatite and magnetite in Kiruna-type iron ores and some other iron ore types"**, Ore Geol. Rev, 9, p:489–510.
- Gandhi, S.S., (2003) **"An overview of the Fe oxide-Cu-Au deposits and related deposit types"**. In CIM Montreal, Mining Industry Conference and Exhibition, Canadian Institute of Mining, Technical Paper, CD-ROM, p.

- Geijer, P., (1967) **"Internal features of the apatite-bearing magnetite ores (Sveriges Geologiska Undersökning)"** .
- Ghazi, J. M., Harris, C., Rahgoshay, M., Moazzen, M., (2019) **"Combined igneous and hydrothermal source for the Kiruna-type Bafq magnetite-apatite deposit in Central Iran; trace element and oxygen isotope studies of magnetite"**. *Ore Geol. Rev.*, 105, p:590–604.
- Goldstein, S.B., Francis, D., (2008) **"The petrogenesis and mantle source of Archaean ferropicrites from the Western Superior Province, Ontario"**. *Canada. J. Petrol.* 49, p:1729–1753.
- Gregg, J. M., Sibley , D. F., (1984) **"Epigenetic dolomitization and the origin of xenotopic dolomite texture. J. Sediment"**. *Res.* 54, p: 908–931.
- Haas, John L. **"The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure."** *Economic geology* 66.6 (1971): 940-946
- Haas J. L. (1976) **"Thermodynamic properties of the coexisting phases and thermodynamic properties of the NaCl component in boiling NaCl solutions"** *U.S. Geol. Survey Bull.*, 1421-B, pp 71.
- Haghipour, A., (1974) **"Etude geologique la region de Biabanak - Bafa (Central Iran) ;Petrologie et tectonique du socle percamberien et sacouverture"**. These universite scientifique et medicale de Grenobal, France, 403 p, Google Search universite scientifique et medicale de Grenobal, France.
- Halliday, A.N., Davidson, J.P., Hildreth, W., Holden, P., (1991) **"Modelling the petrogenesis of high Rb/Sr silicic magmas"**. *Chem. Geol.*, 92, p:107–114.
- Halter, W.E., Heinrich, C.A., Pettke, T., (2005) **"Magma evolution and the formation of porphyry Cu–Au ore fluids: evidence from silicate and sulfide melt inclusions"**. *Miner. Depos.*, 39, p:845–863.
- Harlov, D.E., Meighan, C.J., Kerr, I.D., Samson, I.M., (2016) **"Mineralogy, chemistry, and fluid-aided evolution of the Pea Ridge Fe oxide-(Y+ REE) deposit, southeast Missouri, USA. Econ"**. *Geol.* 111, p:1963–1984.
- Hastie, A.R., Kerr, A.C., Pearce, J.A., Mitchell, S.F., (2007) **"Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: development of the Th–Co discrimination diagram"**. *J. Petrol.*, 48, p:2341–2357.

- Haynes, D.W., Cross, K.C., Bills, R.T., Reed, M.H., (1995) "**Olympic Dam ore genesis; a fluid-mixing model**". *Econ. Geol.*, 90, p:281–307.
- Heidarian, H., Lentz, D., Alirezaei, S., McFarlane, C., Peighambari S., (2018) "**Multiple stage ore formation in the Chadormalu Iron Deposit, Bafq Metallogenic Province, Central Iran: Evidence from BSE imaging and apatite EPMA and LA-ICP-MS U-Pb geochronology**". *Minerals*, 8, 87p.
- Hitzman, M.W., Oreskes, N., Einaudi, M.T., (1992) "**Geological characteristics and tectonic setting of proterozoic iron oxide (Cu □ U □ Au □ REE) deposits**". *Precambrian Res.*, 58, p:241–287.
- Hitzman, M.W., Oreskes, N., Einaudi, M.T., (1992) "**Geological characteristics and tectonic setting of proterozoic iron oxide (Cu □ U □ Au □ REE) deposits**". *Precambrian Res.*, 58, p:241–287.
- Hofstra, A.H., Meighan, C.J., Song, X., Samson, I., Marsh, E.E., Lowers, H.A., Emsbo, P., and Hunt, A.G. (2016). "**Mineral thermometry and fluid inclusion studies of the Pea Ridge iron oxide-apatite–rare earth element deposit, Mesoproterozoic St. Francois Mountains terrane, southeast Missouri, USA**". *Econ. Geol.* 111, 1985–2016
- Irvine, T. N. J., Baragar, W. R. A., (1971) "**A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks**". *Can. J. Earth Sci.*, 8, p:523–548.
- Jami, M., (2006) "**PhD Thesis, "Geology, geochemistry and evolution of the Esfordi phosphate-iron deposit, Bafq area, Central Iran"**". Univ. New South Wales.
- Jensen, L.S., (1982) "**Komatiites in the Ontario portion of the Abitibi belt**".
- Jinjie, Y.U., Qi, Z., Jingwen, M.A.O., Shenghao, Y.A.N., (2007) "**Geochemistry of Apatite from the Apatite-rich Iron Deposits in the Ningwu Region, East Central China**". *Acta Geol. Sin. Ed.*, 81, p:637–648.
- John, D.A., Ayuso, R.A., Barton, M.D. Blakely, R.J., Bodnar, R.J., Dilles, J.H., Gray, F., Graybeal, F.T., Mars, J.C., McPhee, D.K., (2010) "**5070-B. "Porphyry copper deposit model, Chapter B of Mineral Deposit Models for Resource Assessment"**". *Geol. Surv. Sci. Investig.*, 186p.
- Johnson, C.A., Day, W.C., and Rye, R.O. (2016). "**Oxygen, hydrogen, sulfur, and carbon isotopes in the Pea Ridge magnetite-apatite deposit, southeast Missouri, and sulfur isotope comparisons to other iron deposits in the region**". *Econ. Geol.* 111, 2017–2032

- Kesler, S.E., (2005) "Ore-forming fluids". *Elements*, 1, p:13–18.
- Knipping, J. L., Bilinker, L.D., Simon, A.C., Reich, M., Barra, F., Deditius, A.P., Wä ller, M., Heinrich, C. A., Holtz, F., Munizaga, R., (2015) "**Trace elements in magnetite from massive iron oxide-apatite deposits indicate a combined formation by igneous and magmatic-hydrothermal processes**". *Geochim. Cosmochim. Acta*, 171, p:15–38.
- Kunu, H., (1968) "**differentiation of basaltic magma**". *H.H Poldervaart, A 2*, p:623–688.
- Dela Roch de, H., Leterrier, J.t., Grandclaude, P., Marchal, M., (1980) "**A classification of volcanic and plutonic rocks using R1R2-diagram and major-element analyses—its relationships with current nomenclature**". *Chem. Geol*, 29,p: 183–210.
- Loberg, B.E.H., Horndahl, A.K., (1983) "**Ferride geochemistry of Swedish Precambrian iron ores**". *Miner. Depos*, 18, p:487–504.
- Lupulescu, M.V., Hughes, J.M., Chiarenzelli, J. R., Bailey, D.G., (2017) "**Texture, crystal structure, and composition of fluorapatites from iron oxide-apatite (IOA) deposits, eastern Adirondack Mountains, New York**". *Can. Mineral*, 55, p:399–417.
- Mahdavi, M. A., (1996) "**Ravar geological sheet 1:250000**".
- Mao, M., Rukhlov, A.S., Rowins S.M., Spence, J., Coogan, L.A., (2016) "**Apatite trace element compositions: A robust new tool for mineral exploration**". *Econ. Geol*, 111, p:1187–1222.
- Marschik, R., Spikings, R., Kuşcu, I., (2008) "**Geochronology and stable isotope signature of alteration related to hydrothermal magnetite ores in Central Anatolia, Turkey**". *Miner. Depos*, 43,p: 111–124.
- McCafferty, A.E., Phillips, J.D., and Driscoll, R.L. (2016). "**Magnetic and Gravity Gradiometry Framework for Mesoproterozoic Iron Oxide-Apatite and Iron Oxide-Copper-Gold Deposits, Southeast Missouri**". *Econ. Geol.* *111*, 1859–1882
- McDonough, W.F., Sun S.S., (1995) "**The composition of the Earth**". *Chem. Geol*, 120, p:223–253.
- McIntosh, K., van Avendonk, H., Lavier, L., Lester, W.R., Eakin, D., Wu, F., Liu, C.-S., Lee, C.-S. (2013) "**Inversion of a hyper-extended rifted margin in the southern Central Range of Taiwan**". *Geology* *41*,p: 871–874.
- McLennan, S.M., (1989) "**Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes**". *Geochemistry Mineral, Rare Earth Elem. Rev. Mineral*, 21, p: 169–200.

- Middlemost, E.A.K., (1994) **"Naming materials in the magma/igneous rock system"**. Earth-Science Rev, 37,p: 215–224.
- Mokhtari, M.A.A., (2015) **"Posht-e-Badam metallogenic block (central Iran): A suitable zone for REE mineralization"**. Cent. Eur. Geol, 58, p:199–216.
- Mokhtari, M.A.A., Emami, M.H., (2008) **"REE pattern and REE mineralization in Apatite Magnetite Deposits of Bafq-Saghand district (Central Iran)"** . Geosciences 17.
- Mokhtari, M.A A., Sadeghi, M., Nabatian, G., (2018) **"Geochemistry and potential resource of rare earth element in the IOA deposits of Tarom area, NW Iran"**. Ore Geol. Rev, 92, p:529–541.
- Moore, F., Modabberi, S., (2003) **"Origin of Choghart iron oxide deposit, Bafq mining district, Central Iran: new isotopic and geochemical evidence"**. J. Sci. Islam. Repub. Iran 14, p:259–270.
- Müller, W .H., Schmid, S. M., Briegel, U., (1981) **"Deformation experiments on anhydrite rocks of different grain sizes: rheology and microfabric"**. Tectonophysics 78, p:527–543.
- Nabatian, G., Ghaderi, M., Corfu, F., Neubauer, F., Bernroider, M., Prokofiev, V., Honarmand, M., (2014) **"Geology, alteration, age, and origin of iron oxide–apatite deposits in Upper Eocene quartz monzonite, Zanjan district, NW Iran"**. Miner. Depos, 49, p:217–234.
- Nabavi, M., (1972) **"Yazd geological sheet 1:250000"**.
- Nadimi, A., (2007) **"Evolution of the Central Iranian basement"**. Gondwana Res, 12, p:324–333.
- Nadoll, P., Mauk, J.L., Leveille, R.A., Koenig, A.E., (2015) **"Geochemistry of magnetite from porphyry Cu and skarn deposits in the southwestern United States"**. Miner. Depos, 50, p: 493–515.
- Neymark, L.A., Holm-Denoma, C.S., Pietruszka, A.J., Aleinikoff, J.N., Fanning, C.M., Pillers, R.M., and Moscati, R.J. (2016). **"High spatial resolution U-Pb geochronology and Pb isotope geochemistry of magnetite-apatite ore from the Pea Ridge iron oxide-apatite deposit, St. Francois Mountains, southeast Missouri"**, USA. Econ. Geol. *111*, 1915–1933

- NISCO, (1971) **"On the result of geological-geophysical prospecting for iron ores in the Bafq-Saghand and Zarand regions"**.
- Nogole-Sadat, M.A.A., Almasian, M., (1993) **"Tectonic Map of Iran in 11000,000 Scale"**. Geological Survey of Iran, Tehran, References-Scientific Research Publishing.
- Nystroem, J.O., Henriquez, F., (1994) **"Magmatic features of iron ores of the Kiruna type in Chile and Sweden; ore textures and magnetite geochemistry"**. *Econ. Geol.*, 89, p:820–839.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W., Tindle, A.G., (1984) **"Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks"**. *J. Petrol.*, 25, p: 956–983.
- Peccerillo, A., Taylor, S.R., (1976) **"Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey"**. *Contrib. to Mineral. Petrol.*, 58, p:63–81.
- Poshtkoohi, M., Ahmad, T., Choudhary, A.K., (2018) **"Geochemistry and petrogenesis of Biabanak-Bafq mafic magmatism: Implication for the evolution of central Iranian terrane"**. *J. Earth Syst. Sci.*, 127, 72p.
- Rahimi, E., Maghsoudi, A., Hezarkhani, A., (2016) **"Geochemical investigation and statistical analysis on rare earth elements in Lakehsiyah deposit, Bafq district"**. *J. African Earth Sci.*, 124, p:139–150.
- Ramezani, J., Tucker, R D., (2003) **"The Saghand region, central Iran: U-Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana tectonics"**, *Am. J. Sci.*, 303, p:622–665.
- Roedder, E., (1984) **"Fluid inclusions"**. *Rev. Mineral.*, 12, Volume 12.
- Rojas, P.A., Barra, F., Deditius, A., Reich, M., Simon, A., Roberts, M., Rojo, M., (2018) **"New contributions to the understanding of Kiruna-type iron oxide-apatite deposits revealed by magnetite ore and gangue mineral geochemistry at the El Romeral deposit, Chile"**. *Ore Geol. Rev.*, 93, p:413–435.
- Rollinson, H.R., (1993) **"Using geochemical data: evaluation. Present. Interpret. Singapore. Ongman"**.
- Samani, B., (1998) **"Precambrian metallogeny in central Iran"**. *Sci. Bull, At Energy Organ Iran*, 17, p:1–16.
- Samani, B., (1998) **"Precambrian metallogeny in central Iran. Sci. Bull"**. *At. Energy Organ. Iran* 17, p:1–16.
- Samani, B A., (1988) **"Metallogeny of the Precambrian in Iran"**. *Precambrian Res.*, 39, p:



85–106.

- Saruchanjan, L.B., Mkrjtjjan, G.M., (1968) **"Raspedelenie aktsessornykh redkozemelnykh elementov v apatite"**. Izv. AN Armjanskoj SSR 4, p:16–27.
- Sengor, A.M.C., (1991) **"The role of accretionary wedges in the growth of continents: Asiatic examples from Argand to plate tectonics"**. Eclogae Geol. Helv, 84, p:535–597.
- Shekarian, Y., Hezarkhani, A., Anaraki, N. N., Hassani, A. N., (2017) **"Geochemistry and petrography of REE-bearing Fe-oxide assemblages in Choghart iron deposit, Yazd, Iran"**. Arab. J. Geosci, 10, 273p.
- Shelton, K.L., McMenemy, T. A., Hees, E.H.P., Van Falck, H., (2004) **"Deciphering the complex fluid history of a greenstone-hosted gold deposit: fluid inclusion and stable isotope studies of the Giant mine, Yellowknife, Northwest Territories, Canada"**. Econ. Geol, 99, p:1643–1663.
- Sibley, D. F., Gregg, J. M., (1987) **"Classification of dolomite rock textures"**. J. Sediment. Res. 57, p:967–975.
- Sobolev, A., V, (1996) **"Melt inclusions in minerals as a source of principle petrological information"**, Petrology, 4, p:209–220.
- Sobolev, A., V, Danyushevsky, L., V, (1994) **"Petrology and geochemistry of boninites from the north termination of the Tonga Trench: constraints on the generation conditions of primary high-Ca boninite magmas"**. J. Petrol, 35, p:1183–1211.
- Soheili, M., Mahdavi, M. A., (1991) **"Esfordi geological sheet 1:100000"**.
- Sourirajan S. and Kennedy G. C. (1962) **"The system H<sub>2</sub>O-NaCl at elevated temperatures and pressures"** Am. Jour. Sci., 260, pp 115-141
- Stocklin, J., (1968) **"Structural history and tectonics of Iran: a review"**. Am. Assoc. Pet. Geol. Bull, 52, p:1229–1258.
- Stosch, H .G., Romer, R. L., Daliran, F., Rhede, D., (2011) **"Uranium–lead ages of apatite from iron oxide ores of the Bafq District, East-Central Iran"**. Miner. Depos. 46, p:9–21.
- Taghipour, S., Kananian, A., Mackizadeh, M. A., Somarin, A. K., (2015) **"Skarn mineral assemblages in the Esfordi iron oxide–apatite deposit, Bafq district, Central Iran"**. Arab. J. Geosci, 8,p: 2967–2981.

- Taylor, S. R., McLennan, S. M., (1995) "**The geochemical evolution of the continental crust**", *Rev. Geophys.*, 33, p:241–265.
- Thompson, R. N., (1982) "**Magmatism of the British Tertiary volcanic province**". *Scottish J. Geol.*, 18, p:49–107.
- Torab, F. M., (2008) "**Geochemistry and metallogeny of magnetite apatite deposits of the Bafq mining district, Central Iran. Papierflieger**".
- Tornos, F., Velasco, F., Hanchar, J.M., (2017) "The magmatic to magmatic-hydrothermal evolution of the El Laco deposit (Chile) and its implications for the genesis of magnetite-apatite deposits". *Econ. Geol.* 112, p:1595–1628.
- Ulrich, T., Guenther, D., Heinrich, C. A., (1999) "**Gold concentrations of magmatic brines and the metal budget of porphyry copper deposits**". *Nature* 399, 676p.
- Weng, Z. H., Jowitt, S. M., Mud, G. M., Haque, N., (2013) "**Assessing rare earth element mineral deposit types and links to environmental impacts**". *Appl. Earth Sci.*, 122, p:83–96.
- Westhues, A., Hanchar, J.M., Voisey, C.R., Whitehouse, M.J., Rossman, G.R., Wirth, R., (2017) "**Tracing the fluid evolution of the Kiruna iron oxide apatite deposits using zircon, monazite, and whole rock trace elements and isotopic studies**". *Chem. Geol.* 466, p:303–322.
- Whitney, D L., Evans, B W., (2010) "**Abbreviations for names of rock-forming minerals**". *Am. Mineral.* 95, p:185–187.
- Wilkinson, J. J., (2001) "**Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits**". *Lithos* 55, p:229–272.
- Winchester, J. A., Floyd, P. A., (1977) "**Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements**". *Chem. Geol.* 20, p: 325–343.
- Wood, D. A., (1980) "**The application of a ThHfTa diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province**". *Earth Planet. Sci. Lett.*, 50, p:11–30.
- Zarei, A., Shafaroudi, A.M., Karimpour, M.H., (2016) "**Geochemistry and genesis of iron-apatite ore in the Khanlogh deposit, Eastern Cenozoic Quchan-Sabzevar Magmatic Arc, NE Iran**". *Acta Geol. Sin. Ed.* 90, p:121–137.

## **Abstract**

The study area is located 120 km northeast of Bafq city in Yazd Province. This area is a part of the Posht-e- Badam Block in the Central Iran micro-continent. In the present research, studies were performed on Esfordi, Gazestan, and Lakehsiyah, and Choghart areas. Samples were taken from rocks and ore for petrological, mineralogical, geochemical and fluid inclusion investigations. Based on field observations, Rizu series with Late Neoproterozoic – Early Cambrian age is widespread sequences in the Bafq metallogenic area. The Rizu series represents an alternation of dolomitic rocks, sandstone, tuffaceous sandstone, shale, basaltic lava and tuff, rhyolitic lava and tuff, rhyodacite to andesite, metasomatites, iron-bearing chert strips (jaspillite), and iron-magnesium oxides. In this area metasomatites are host rocks of iron-oxide and apatite mineralization, the ore bodies dividing as magnetite-rich, magnetite-apatite-rich, and apatite-rich ores based on the content of magnetite and apatite. Mineralization is observed as banded, massive, vein-veinlets, and rarely stockwork, disseminated, brecciated, open space-filling forms. Mineralogical and texture studies have indicated the presence of four generations of apatite and three generations of magnetite. Petrological studies based whole igneous rock geochemistry proved that those have formed in an intra-continent rift environment. The grades of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , and  $\Sigma\text{REE}$  in ore bodies range from 8.68 – 90.65%, 0.47 – 35.51%, and 357 – 14762 ppm, respectively. The reference samples-normalized rare earth elements (REE) distribution patterns of ores are similar each other, and indicating enrichment of light REE relative to heavy REE and negative Eu anomaly. The average homogenization temperature and salinity of the fluid inclusions in the first-generation apatite were 208°C and 20.24 wt. % NaCl equivalent, respectively, while the second-generation apatite were 181°C and 10.36 wt. % NaCl equivalent, respectively. Accordingly, the first-generation apatite showed higher homogenization temperature and salinity than the second-generation apatite. The low salinity of the second-generation apatite could be related to mixing magmatic fluids with meteoric waters in the late stages of mineralization. Finally, based on the geological, mineralogical, geochemical and fluid inclusion evidences, the iron oxide-apatite mineralization at the Bafq Metallogenic Zone was found to resemble with Kiruna-type iron oxide-apatite (IOA) deposits, where a mix of magmatic and hydrothermal processes contributed to the formation of such deposits.

**Keyword:** Iron oxide-apatite, geochemistry, fluid inclusion, magmatic-hydrothermal, Kiruna-type, Bafq.



**Shahrood University of technology**

**Faculty of Earth Sciences**

**M.Sc. Thesis in Economic Geology**

**Mineralogy, geochemistry and mineralization of rare  
earth elements in metasomatites from the Esfordi  
region, Northeast of Bafq**

**By: Erfan Amidimehr**

Supervisors:

**Dr. Masood Alipour-Asll**

**Dr. Habibollah ghasemi**

**January 2020**